Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

Faculté des Sciences

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Intensification de la consommation du bambou : solution écologique ou exploitation inquiétante ?

L'exemple des matériaux de construction

Mémoire de Fin d'Études présenté par

GONDA Louise

en vue de l'obtention du grade académique de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement ENVI5G-M

Année Académique : 2011-2012

Directeur : Prof. Marie-Françoise GODART

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon professeur et promoteur, Marie-Françoise Godart, pour avoir accepté de me suivra dans ce sujet quelque peu exotique et pour ses conseils lors de la rédaction de mon travail.

Je remercie également mon professeur Marc Degrez pour m'avoir orienter vers les personnes adéquates. En ce sens, je remercie particulièrement Vanessa Zeller pour son aide précieuse tout au long de mon étude et pour tout le temps qu'elle m'a consacré durant ces derniers mois.

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude envers Joost Vogtländer, Benoit Hargot, Céderic Doutrelepont et Nicolas Delfosse pour leur aide lors de ma collecte de données ainsi que pour leurs réponses à mes nombreuses questions.

J'aimerais remercier de tout cœur ma famille et m es amis pour le soutien constant qu'ils m'ont apporté durant ce travail et cette année d'étude supplémentaire, avec une attention plus particulière à Renaud Marteleur et Maximilien Renard qui m'ont supportée et motivée à aller au bout de ce sujet de mémoire, et ce malgré les obstacles.

Enfin, j'aimerais remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de la rédaction de ce mémoire et se reconnaîtront. Cette année d'étude complémentaire en gestion de l'environnement a été pour moi très enrichissante, que ce soit au niveau de mes connaissances ou sur le plan humain.

RÉSUMÉ

De nos jours, les produits à caractère écologique sont légions. Parmi tous ces produits, une essence attire particulièrement notre attention : le bambou. En tant qu'aliment dans la cuisine asiatique ou comme plante décorative, le bambou possède bien d'autres applications dans des domaines variés allant de l'énergie à la médecine traditionnelle en passant par la construction. C'est d'ailleurs à travers l'exemple d'un matériau, le lamellé-collé, que ce travail s'intéresse au potentiel écologique du bambou dans le cadre d'une utilisation dans les pays occidentaux.

Par ces diverses caractéristiques (matériau fibreux, bonne résistance, croissance rapide, ...), le bambou semble être un candidat sérieux comme matériau durable, en rivalité avec le bois. Cependant, malgré ces avantageuses caractéristiques, le bambou présente une série de problèmes dont notamment sa non-régularité et sa forme tubulaire qui complique son utilisation. Afin de pallier à ces difficultés, le bambou peut être transformé. Les chaumes sont découpés en lamelles qui sont encollées et comprimées pour former un nouveau matériau : le Strand Woven Bamboo (SWB). Les planches de SWB peuvent ensuite être utilisées afin d'élaborer des poutres en lamellé-collé.

Pour se faire une idée des impacts que représente la construction d'une telle poutre, nous en avons effectué une Analyse de Cycle de Vie (ACV) partielle comparative. La comparaison est faite avec une poutre lamellé-collé standard en bois. L'analyse est dite partielle car elle ne considère pas l'utilisation et la fin de vie des poutres. Bien que dépendant d'un certain nombre d'hypothèses, les résultats de l'ACV nous permettrons d'avancer que les impacts générés par la fabrication de la poutre de bambou sont plus importants, excepté pour l'occupation du sol. Cela ne suffit malheureusement pas à compenser les autres effets qui proviennent surtout : de la chaleur, nécessaire à plusieurs étapes du processus de fabrication, issue de la combustion de sciure de bambou, de l'énergie consommée et du transport. Nous avons également proposé quelques pistes d'amélioration qui ne se révèlent pas très concluantes.

En définitive, ce travail montre, au travers de l'exemple du bambou, dans quelle mesure un matériau de base (le chaume de bambou), à première vue très intéressant au niveau environnemental, peut perdre tous ses avantages au travers de son processus de fabrication. Sans pour autant que cela n'entame son image « verte » auprès du consommateur.

Mots clés : Bambou, Analyse de cycle de vie, Lamellé-collé, Construction

Table des matières

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Index des tableaux

Index des graphes

Lexique des acronymes

Acronyme	Nom complet	Première utilisation en page....
ACV	Analyse de Cycle de Vie	2
BMB	Bamboo Mat Board	28
ELS	État Limite de Service	44
ELU	État Limite Ultime	44
ICV	Inventaire de Cycle de Vie	38
INBAR	International Network for Bamboo And Ratan	7
ISO	International Organization for Standardization (français : Organisation Internationale de Normalisation)	36
NCBI	National Center for Biotechnology Information	18
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur	15
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry (français : Société de Toxicologie et Chimie Environnementale)	36
SITI	Système d'Information Taxonomique Intégré	18
SWB	Strand Woven Bamboo	28
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature	14
UNEP	United Nations Environment Program (français : PNUE – Programme des Nations Unies pour l'Environnement)	7
WCMC	World Conservation Monitoring Centre (français : Centre de surveillance de la conservation de la nature)	7

INTRODUCTION

A. PROBLÉMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE

Ces dernières années, nous avons pu observer un véritable engouement pour toute une série de produits dits « verts » : des voitures à faibles émissions de CO_2 au tourisme durable, en passant par les légumes bios. L'écologie est devenue un véritable marché et la protection de l'environnement un argument marketing.

Parmi tous ces produits se trouve le bambou. Comme nous le verrons au cours de ce travail, de nombreux produits sont fabriqués à base de bambou et sont souvent présentés comme écologiques. C'est le cas par exemple des vêtements en fibres de bambou ou des parquets en bambou. Malheureusement, la réalité n'est pas toujours ce que les producteurs disent de leurs produits : c'est ce qui est appelé le greenwashing[1].

Dans le secteur de la construction également, nous pouvons remarquer un gain d'intérêt pour les matériaux dits durables. Grâce notamment à ses propriétés techniques dont nous parlerons dans le premier chapitre de ce travail, le bambou semble être un candidat sérieux.

Cette série de constatations aboutit à un questionnement d'où découle la question de recherche à la base de ce travail. Nous présentons ce raisonnement ci-dessous.

Au premier abord, le bambou donne l'impression d'être un remède écologique miracle. Mais est-ce vraiment le cas ? Si oui, que se produirait-il en cas de subite intensification de l'utilisation des matériaux à base de bambou ? Il y aurait-il un risque de surexploitation des ressources ou de destruction d'écosystèmes afin de planter plus de bambou ? Si non, est-il néanmoins possible d'imaginer une augmentation de l'utilisation d'un produit aux apparences écologiques trompeuses ? Quels seraient les impacts de cette utilisation ?

En tant qu'ingénieur civil en construction, ce questionnement s'est naturellement dirigé vers le secteur de la construction. La question de recherche est donc : ***l'utilisation du bambou comme matériau de construction peut-elle représenter une alternative écologiquement acceptable aux matériaux dits « standards » en Europe ?***

B. MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre pour le mieux à cette question, le travail s'articulera de la façon suivante.

Tout d'abord, nous dresserons le cadre général du travail. Nous y présenterons l'un des acteurs principaux : le bambou. Nous parlerons de la plante en elle-même, de ses principales utilisations

1 « Terme anglophone qui peut être traduit par verdissement d'image. Il est utilisé par les groupes de pression environnementaux pour désigner les efforts de communication des entreprises sur leurs avancées en termes de développement durable, avancées qui ne s'accompagnent pas de véritables actions pour l'environnement. Le terme Greenwashing trouve son origine dans la contraction des mots green, vert et brainwashing, ou lavage de cerveau. » [Melquiot : 2003]

existantes (aussi bien par l'homme que par la faune) et de ses nombreux avantages. Nous présenterons ensuite l'espèce à partir de laquelle le matériau analysé dans ce travail est fabriqué : *Phyllostachys edulis*. Nous terminerons les aspects généraux par une mise en garde à propos des pressions sur les ressources en bambou.

Ensuite, nous entrerons dans le vif du sujet en présentant plus en détail l'utilisation du bambou dans la construction. Nous parlerons des avantages et inconvénients que cela peut représenter et nous décrirons différents matériaux fabriqués à partir de bambou pouvant s'adapter aux pays occidentaux. Nous terminerons en nous concentrant sur le matériau que nous avons choisi d'analyser à titre d'exemple : le lamellé-collé.

Pour répondre à la question de recherche, nous ferons une Analyse de Cycle de Vie (ACV) comparative entre une poutre lamellé-collé traditionnelle en bois et une poutre lamellé-collé en bambou, afin de déterminer les différences d'impacts existant entre ces deux matériaux ainsi que les origines de ces impacts. Nous essayerons également de voir dans quelle mesure les impacts dus à la fabrication de la poutre en bambou peuvent être diminués.

Une fois que nous aurons établi cela, tout en gardant en tête les limites de notre analyse, nous conclurons en apportant une proposition de réponse à la question de recherche.

Cadre général

A. Introduction

Ce premier chapitre a pour but de présenter le cadre général du travail et son principal acteur : le bambou.

Nous commencerons par une description de la plante qui présentera à la fois la classification du bambou, ses éléments constitutifs, ses caractéristiques techniques, l'état des connaissances à son sujet et sa répartition mondiale.

Ensuite, nous parlerons des multiples usages du bambou, par la faune et par l'homme.

Nous terminerons par la présentation de l'espèce dont nous parlerons majoritairement dans ce travail ainsi que par un état des lieux des pressions qui existent sur les ressources de bambou.

B. Description du bambou

1. Classification

Le bambou est une plante monocotylédone[2] faisant partie de la famille des Poacées, également appelées graminées, et de la sous-famille des Bambusoidées. Le bambou n'est donc pas un arbre mais une herbe géante [Hargot : 2009].

Actuellement, le nombre d'espèces de bambou est estimé à 2000 dont 50 à 100 sont réellement utilisées. Ces différentes espèces sont réparties entre 60 à 90 genres. Il s'agit bien là d'approximations puisque, comme expliqué par la suite, la classification des différentes espèces de bambou est rendue fort complexe par une série de facteurs [Bystriakova et al. : 2003b] [Bystriakova et al. : 2003a] [Hargot : 2009].

2. Caractères généraux

Le bambou comporte différentes parties caractéristiques (Illustration 1) :

- ***Le rhizome***

Le rhizome est un système racinaire se développant sous le chaume. Sa propagation dans le sol lui permet de recueillir et stocker les nutriments nécessaires à la croissance de la plante. Il remplit en quelque sorte le rôle de tronc.

L'apparence et le comportement des rhizomes varient selon les espèces. Ils sont divisés en deux grandes catégories selon leur propagation : les rhizomes pachymorphes et leptomorphes. Les premiers, dont la

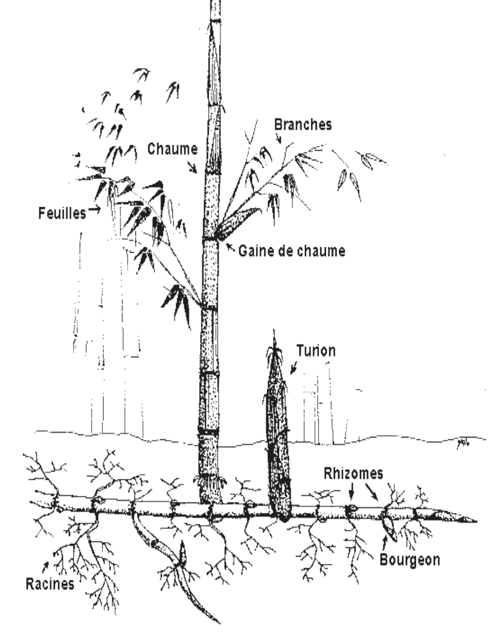


Illustration 1: Différentes parties du bambou [AEB : s.d.]

2 « Plante dont la graine n'a qu'un seul cotylédon, feuille primordiale constitutive de l'embryon qui sert de réserve à la plantule » [Larousse : 2012]

propagation est dite sympodiale, sont courts et épais et s'agglomèrent en touffes plus ou moins denses. Par conséquent, ils ne se développent que sur des courtes distances. Les seconds, dont la propagation est dite monopodiale ou traçante, sont longs et minces. Certaines espèces peuvent faire croître leurs rhizomes jusqu'à 20 mètres en une seule saison. Il existe également une propagation intermédiaire alliant les caractéristiques monopodiales et sympodiales : elle est dite amphipodiale.

Les rhizomes sont segmentés et recouverts d'une gaine de protection. Les bourgeons et racines se situent au niveau des nœuds formés par la segmentation du rhizome. Une des fonctions remplies par les racines est le stockage des nutriments, mais leur fonction première est d'ancrer la plante dans le sol [Complete Bamboo : 2012] [Hargot : 2009] [Janssen : 2000].

- ***Le chaume***

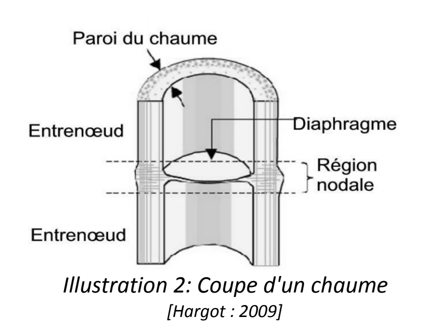


Illustration 2: Coupe d'un chaume [Hargot : 2009]

Certains bourgeons se développent et sortent du sol sous forme de turions qui possèdent déjà le diamètre final du chaume qu'il deviendra en se développant.

Bien qu'il puisse varier en épaisseur, taille (de quelques centimètres jusqu'à 40 mètres), forme (droit ou courbé) ou couleur (vert, jaune,...), le chaume est la partie la plus caractéristique du bambou. Comme le montre l'Illustration 2, il est habituellement creux et constitué de différents caissons séparés par des diaphragmes formant ainsi les nœuds. Au niveau de chacun d'eux, deux marques sont présentes. La première (partie inférieure) est la marque laissée par la gaine de feuilles protégeant le chaume. La seconde (partie supérieure) est une marque de croissance de la plante [Daytonb, Hamesb, Scurlocka : 2000].

- ***Les feuilles***

Le bambou possède deux types de feuilles.

Tout d'abord des feuilles « gaines » qui sont présentes à différentes parties de la plante. Dans un premier temps, elles forment une gaine de protection autour du rhizome. Une fois que ce dernier sort du sol pour devenir un chaume, les feuilles se développent suivant le même schéma qu'une herbe et finissent par tomber. Comme déjà mentionné, les légères entailles visibles sous les nœuds sont des traces de la gaine de feuilles qui entourait le chaume. Comme pour toutes les graminées, ces feuilles possèdent certaines caractéristiques présentées sur l'Illustration 3 [Chine Informations : s.d.].

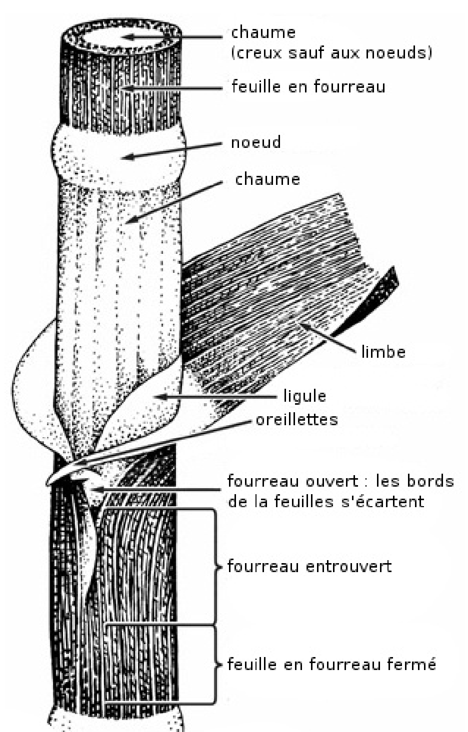


Illustration 3: Caractéristiques du chaume et des feuilles [OMAFRA : 2011].

Ensuite, il y a les feuilles plus classiques. Ces dernières, attachées aux rameaux formés à partir du chaume, sont généralement

persistantes. Elles sont composées du limbe[3], oblong voir lancéolé, d'un pétiole[4], souvent court, d'une gaine[5] qui, par recouvrement avec celles des autres feuilles, forme les rameaux, et parfois d'une ligule[6] et d'oreillettes[7] [UCL : s.d.].

En convertissant la lumière du soleil en énergie, les feuilles assurent la fonction de photosynthèse de la plante. L'apparition des feuilles joue un rôle important dans l'identification de l'espèce. En effet, dans certaines espèces, les feuilles sont très grandes et moins nombreuses, tandis que d'autres espèces ont une grande quantité de très petites feuilles.

- ***Les fleurs***

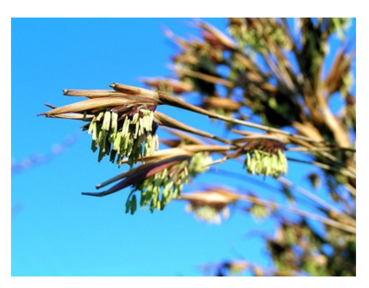


Illustration 4: Fleur de bambou
[Complete Bamboo : 2012].

Contrairement à la majorité des plantes et arbres, le bambou fleurit rarement. L'intervalle de floraison peut dépasser les dix ans jusqu'à atteindre, pour certaines espèces, plus de cent ans. De plus, tous les bambous d'une même espèce fleurissent simultanément et indépendamment de l'âge de la plante, des conditions extérieures ou de la position géographique : comme si cela était programmé dans la structure génétique des plantes. Cependant, à l'heure actuelle, cette floraison particulière n'est encore expliquée par aucune théorie scientifique.

Les fleurs elles-mêmes n'ont rien de spectaculaire (Illustration 4) : comme la plupart des graminées, elles n'ont pas de pétales.

Chez la plupart des espèces, après avoir fleuri, les chaumes se dessèchent et le bambou meurt. En effet, pour permettre la floraison, la plante produit moins de feuilles et consomme une grande partie, voir la totalité, de ses réserves, ce qui l'affaiblit grandement et engendre souvent sa fin.

En taxonomie[8], l'identification des espèces se fait souvent à partir des fleurs, qui sont généralement des éléments très distinctifs. Ces longs intervalles de floraison rendent donc la classification difficile. D'autres éléments, comme les feuilles, sont donc utilisés en vue de distinguer les différentes espèces.

- ***Les fruits/graines***

Les fruits du bambou sont généralement des caryopses (fruits caractéristiques des graminées) à ouverture non spontanée et qui ne comportent qu'une seule graine (Illustration 5).

Semblables à des grains de blés, il existe cependant des différences dans la micromorphologie des graines. Des disparités existent également entre les espèces de bambou [Chaomao et Yuming : 2010].



Illustration 5: Fruit de bambou
[Chaomao et Yuming : 2010]

3 « Partie principale, élargie et étalée de la feuille. » [Larousse : 2012]
4 « Petite languette membraneuse apparaissant à la limite de la gaine foliaire et du limbe. » [Larousse : 2012]
5 « Portion inférieure élargie du pétiole d'une feuille. » [UCL : s.d.]
6 « Petite languette membraneuse apparaissant à la limite de la gaine foliaire et du limbe. » [UCL : s.d.]
7 « Expansion de la base du limbe au-delà et de part et d'autre du point d'insertion d'une feuille qui entoure complètement l'axe sur lequel elle est insérée. » [UCL : s.d.]
8 « Science des lois de la classification » [Larousse : 2012]

3. Caractéristiques techniques

- ***Propriétés chimiques***

La composition chimique du bambou est similaire à celle du bois. Les principaux constituants des chaumes, pour 90% de leur masse, sont : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Une différence par rapport au bois est qu'il contient plus d'extraits alcalins, de cendres et de silice ainsi que des minéraux.

Le bambou contient également de l'amidon, des protéines et des glucides. Ces derniers jouent un rôle important dans sa durabilité. La résistance du bambou contre les moisissures, les champignons et les insectes est fortement liée à sa composition chimique.

Les propriétés chimiques du bambou varient avec son âge et sont en corrélation avec ses propriétés physiques et mécaniques [Xiaobo : 2004].

- ***Propriétés physiques et mécaniques***

C'est la cellulose qui, comme pour le bois, donne au bambou ses propriétés mécaniques. Sa structure moléculaire lui confère une résistance à la traction[9] de l'ordre de 8000 N/mm² [Hargot : 2009].

Pour ce qui est de leur constitution physique, les chaumes de bambou sont composés pour environ 50% de parenchymes[10], 40% de fibres (pour la résistance) et 10% de vaisseaux et de tissus conducteurs. Le bambou est donc en quelque sorte un matériau composite constitué de fibres cellulosiques dans une matrice ligneuse. En général (il existe des variations selon les espèces), les fibres du bambou sont plus longues que celles du bois [Xiaobo : 2004] [Ghavami : 2004].

Comme le montre la coupe transversale sur l'Illustration 6, la quantité de fibres est plus importante dans le tiers extérieur afin d'assurer la résistance du chaume.

Au niveau des nœuds, bien que la densité soit plus grande, les performances mécaniques sont moindres en raison de fibres plus courtes. Les nœuds constituent donc le point faible du chaume.

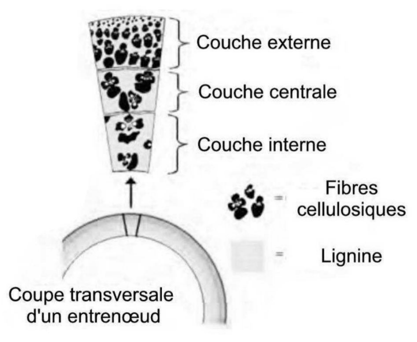


Illustration 6: Coupe transversale chaume [Hargot : 2009]

Comme il a déjà été mentionné, les propriétés du bambou varient avec son âge : elles augmentent puis diminuent avec un maximum aux alentours de 3-4 ans. Des différences sont également observées entre espèces. Il est donc difficile de présenter une seule valeur par caractéristique technique. Un tableau comparatif reprend les propriétés moyennes du bambou par rapport à celles du bois (Tableau 1).

---

9 Contrainte maximale de traction qu'un matériau peut subir avant qu'il n'y ait rupture. A titre d'exemple, l'acier de construction a une résistance à la traction classique allant de 235 à 355 Mpa (= 355 N/mm²), le sapin (12% d'humidité, sans imperfection et parallèlement aux fibres) 80 Mpa et le lamellé collé 24 à36 Mpa. Ces valeurs s'obtiennent suivant des essais normalisés [Frey : 2006]

10 « Tissu fondamental des végétaux formé de cellules vivantes peu différenciées remplissant des fonctions variées (nutrition, réserve, remplissage). » [Larousse : 2012]

Tableau 1: Propriétés mécaniques bois et bambou, *inspiré de [Hargot : 2009]*

Matériaux	Densité	σ_c [11] [N/mm²]	σ_t [12] [N/mm²]	σ_m [13] N/mm²	E[14] [N/mm²]
Bambou	0,7	64	194	117	14 000
Bois	0,4	38	95	42	10 000

De manière générale, les performances techniques atteintes par le bambou sont supérieures à celles du bois. Ce qui en fait un matériau compétitif.

4. État des connaissances

Bien que le bambou soit beaucoup utilisé, peu de choses sont connues à son sujet. En effet, selon l'United Nations Environment Programme's World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), et l'International Network for Bamboo and Rattan (INBAR), le bambou est considéré comme une des grandes plantes les moins étudiées. Puisqu'il fait partie de la famille des graminées, le bambou n'est pas un arbre : c'est un produit non ligneux de la forêt. Or ce type de produit n'est pas souvent inclus dans les inventaires forestiers [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b].

D'autres facteurs rendent difficile l'évaluation des ressources en bambou :

- Les incertitudes associées à sa taxonomie, notamment en ce qui concerne la floraison qui, comme expliqué plus haut, rend la classification directe complexe et permet difficilement de vérifier des classifications faites précédemment (puisque cela implique d'attendre une nouvelle floraison).
- Les usages très diversifiés et à différents niveaux (local, national, ...).
- La quantité importante de produits utilisés hors du circuit économique traditionnel.
- Le manque de terminologie commune et d'unités de mesure.

Depuis le début de sa classification initiée en 1753 par Carl Linnaeus, père de la taxonomie moderne, le nombre d'espèces connues continue d'augmenter sans que nous puissions nous faire une idée de la quantité restant encore à découvrir. La description des bambous est donc en continuelle évolution. D'une part parce que de nouvelles espèces sont encore à découvrir et à décrire, et d'autre part parce que d'anciennes classifications sont à compléter et à vérifier. Notamment grâce aux évolutions technologiques telles que le séquençage de l'ADN, de nouveaux critères d'organisation pourront être mis en place [Waggoner : 2009].

Les ressources disponibles pour l'étude du bambou étaient et sont toujours très limitées. Il en résulte une priorité des recherches pour un ensemble relativement restreint de 38 espèces qualifiées de « prioritaires » pour leur commercialisation ou diffusion importante. En comparaison avec les 1200

11 Résistance à la compression : contrainte maximale de compression qu'un matériau peut subir avant qu'il n'y ait rupture. En fonction de sa classe de résistance, le béton peut atteindre une résistance à la compression de 60 Mpa. [Frey : 2006]
12 Résistance à la traction (voir précédemment)
13 Résistance à la flexion : contrainte maximale qu'un matériau peut subir avant qu'il n'y ait rupture « sous l'action d'une force transversale ». [Frey : 2006] [Larousse : 2012]
14 Module d'élasticité ou de Young : « Constante de proportionnalité de la loi de Hooke » qui lie de façon linéaire la force appliquée à un matériau à sa déformation. [Frey : 2006]

espèces estimées, les recherches sont donc fortement limitées. De plus, la majorité de ces 38 espèces se trouvent dans des plantations : ce qui leur assure une certaine conservation. Pour ce qui est des espèces se trouvant en forêt, en raison de la déforestation, elles sont plus vulnérables. Cela est inquiétant puisqu'elles jouent en réalité un rôle important dans la conservation des espèces « prioritaires ». En effet, elles représentent une sorte de sauvegarde génétique pour les espèces cultivées [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b].

5. Aspects environnementaux

La littérature renseigne certains aspects environnementaux relatifs au bambou et à sa culture.

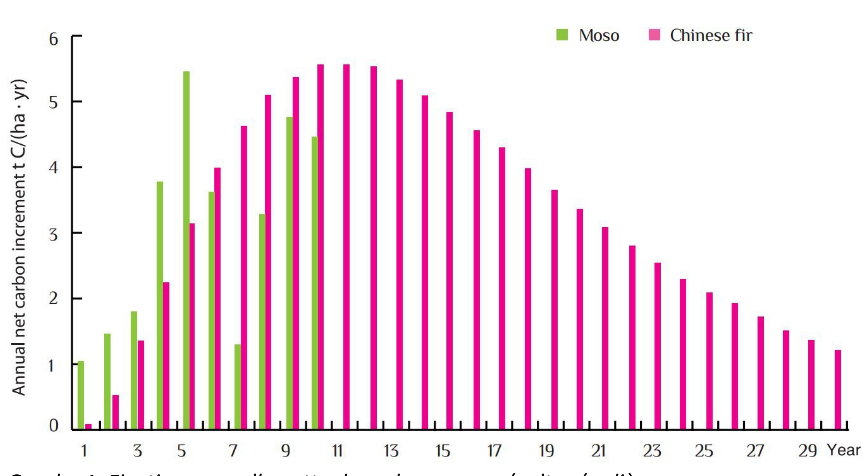
- ***Impacts positifs***

Par sa croissance rapide, le bambou développe activement un important réseau racinaire. Ce dernier maintient le sol tout en augmentant sa perméabilité et le préserve d'un lessivage lors de fortes pluies, ce qui modère l'érosion. Les rhizomes influencent également l'activité bactérienne du sol, ce qui a permis de développer certaines utilisations spécifiques du bambou que nous mentionnerons par la suite.

Aussi bien le feuillage du bambou, qui forme un véritable « toit de feuilles », que le tapis de feuilles mortes au sol jouent un double rôle de protection de ce dernier : tout d'abord, comme pour les rhizomes, en protégeant le sol en cas de fortes pluies mais également en empêchant une trop importante évaporation de l'eau. Cela permet de maintenir une certaine humidité dans le sol [Janssen : 2000].

Comme nous le montrerons, le bambou est une source de nourriture et un habitat pour beaucoup d'espèces, ce qui en fait un élément essentiel pour de nombreux écosystèmes.

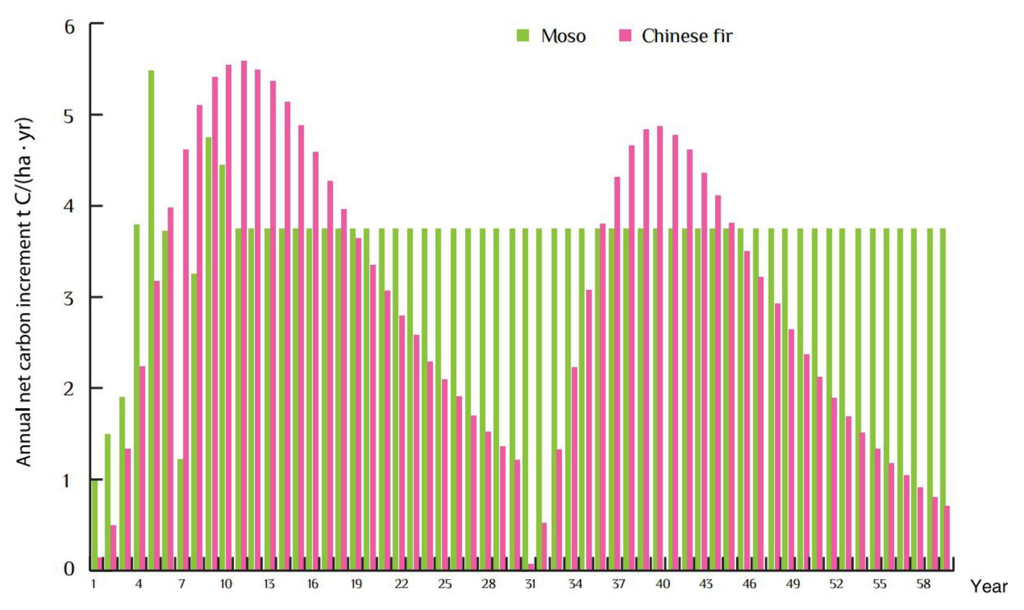
Un dernier aspect à aborder est la séquestration du carbone. De manière globale, une forêt de bambou fixe autant de carbone qu'une forêt classique. Il y a cependant une différence au niveau de l'évolution du taux de fixation comme le montre le graphe ci-contre (Graphe 1) qui compare une forêt de bambou Moso avec une forêt traditionnelle chinoise.



Graphe 1: Fixation annuelle nette de carbone sans récolte régulière [Buckingham et al. : 2010]

Même si la situation se rencontre peu souvent, il y a cependant lieu de faire remarquer que, dans le cas d'une forêt de bambou sans aucune influence humaine (autrement dit, sans récolte régulière des cannes matures), le résultat est tout autre (Graphe 2). En raison du cycle de vie relativement court du bambou, la dégradation des chaumes mortes équilibre la nouvelle fixation de carbone après une dizaine d'années.

Le carbone est fixé à la fois dans la plante et, pour une grande partie, dans le sol. Dans la plante elle



Graphe 2: Fixation annuelle nette de carbone avec récolte régulière [Buckingham et al. : 2010]

même, c'est la partie hors du sol (et majoritairement le chaume) qui fixe le maximum de carbone.

Pour ce qui est des données chiffrées, de nombreuses variations existent en fonction des différentes méthodologies employées, du type de bambou, de la situation géographique, ... Les résultats dépendent également du fait que la fixation du carbone dans le sol soit oui ou non prise en compte.

L'information importante à retenir est la suivante. Pour maximiser le potentiel de séquestration du carbone du bambou et obtenir une fixation identique à celle des forêts traditionnelles, l'intervention humaine est nécessaire mais doit rester raisonnable. En effet, en cas de culture intensive, la fixation du carbone dans le sol et dans la partie souterraine de la plante diminue [Buckingham et al. : 2010] [Isagi : 1997] [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Impacts négatifs***

Peu d'informations relatives à d'éventuels impacts négatifs sont disponibles dans la littérature en dehors de ceux engendrés par une exploitation anthropique. Une étude [Janssen : 2000] mentionne tout de même une modification du pH du sol en présence de l'espèce *Guada*. Toutefois, il est précisé que le sol était déjà légèrement acide au départ.

6. Répartition

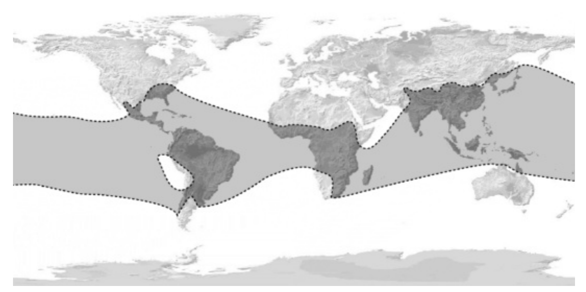


Illustration 7: Répartition du bambou dans le monde [Chine Informations : s.d.]

Contrairement à ce que de nombreuses personnes pensent, le bambou ne se limite pas au continent asiatique. Même si les différentes espèces de bambou sont majoritairement originaires d'Asie, elles proviennent également d'Amérique. De plus, le bambou se développe naturellement sur tous les continents, excepté l'Europe et l'Antarctique. En effet, il s'est

adapté à une multitude de climats et fait partie d'écosystèmes très variés : des forêts d'Afrique jusqu'à 3000 m dans l'Himalaya. Comme le montre l'Illustration 7, l'aire de répartition du bambou s'étend du 40[ième] parallèle Nord au 40[ième] parallèle Sud [Chaomao et Yuming : 2010] [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b].

Comme il a été dit au point précédent, le nombre d'espèces découvertes est toujours en augmentation. Les données présentées ci-dessous datent de 2004 et ont plus que probablement évolué. En considérant que les proportions entre pays et continents ont gardé les même tendances, elles restent cependant intéressantes.

Nous considérons ici trois zones : l'Asie/Pacifique, l'Amérique et l'Afrique.

- ***Asie/Pacifique***

Dans la région Asie-Pacifique, près de 1000 espèces sont à dénombrer. A partir des cartes de répartition de chaque espèce, l'UNEP génère des cartes montrant la richesse taxonomique potentielle qui peut être considérée comme un indicateur de distribution à grande échelle de la biodiversité.

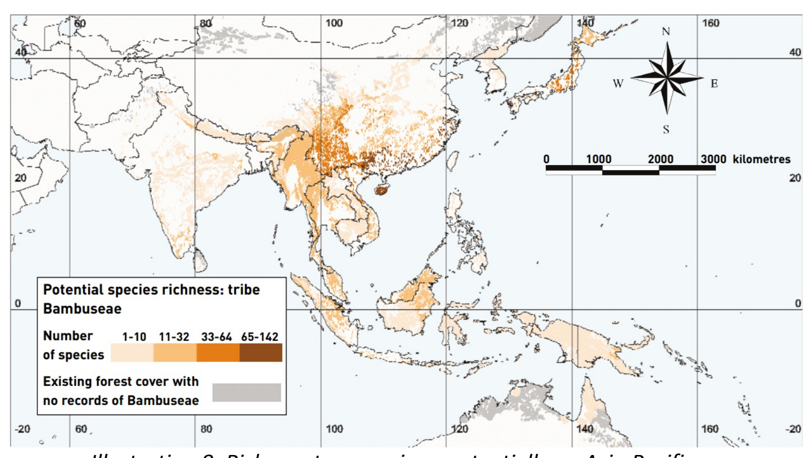


Illustration 8: Richesse taxonomique potentielle en Asie-Pacifique
[Bystriakova et al. : 2003b]

Dans cette région (Illustration 8), c'est la Chine qui, avec 626 espèces, est le pays disposant du plus grand nombre d'espèces reconnues. Elle détient donc plus de la moitié des espèces présentes dans la région Asie-Pacifique et est suivie par l'Inde et le Japon qui ne possèdent respectivement que 102 et 84 espèces. Cette grande diversité pourrait être une des raisons pour lesquelles le bambou est souvent associé à l'Asie [Bystriakova et al. : 2003b].

- ***Amérique***

Bien que l'Amérique possède moins de diversité taxonomique que la région Asie-Pacifique, 430 espèces y sont dénombrées (Illustration 9).

La plus grande diversité est atteinte en Amérique du Sud, au Brésil, qui compte deux fois plus d'espèces (164 espèces) que les pays avoisinant (Vénézuela : 68 espèces, Colombie : 56 espèces) [Bystriakova et al. : 2003a].

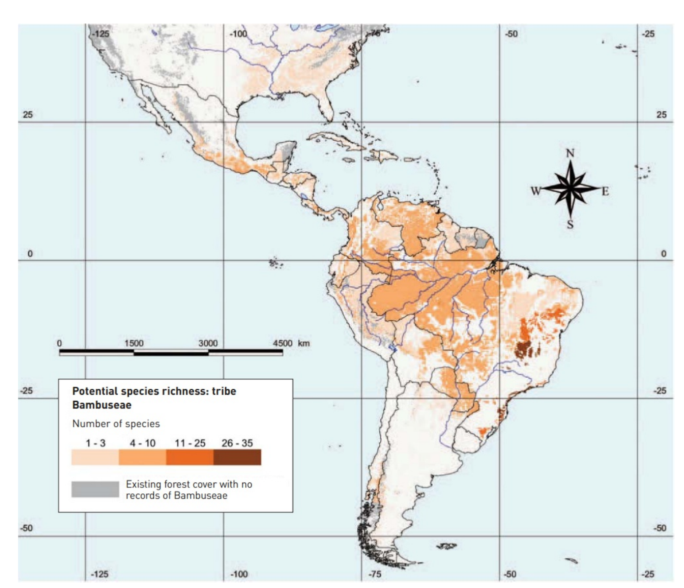


Illustration 9: Richesse taxonomique potentielle en Amérique
[Bystriakova et al. : 2003a]

- ***Afrique***

Seules 5 espèces sont présentes sur le continent africain. C'est la Tanzanie (4 espèces) qui dispose du plus grand nombre d'espèces, suivie par le Malawi, l'Ouganda et la Zambie qui possèdent tous 3 espèces (Illustration 10) [Bystriakova et al. : 2003a].

Illustration 10: Richesse taxonomique potentielle en Afrique
[Bystriakova et al. : 2003a]

Cette faible diversité peut être expliquée par les variations climatiques sur le continent qui, depuis l'éclatement du Gondwana (« super continent à l'origine de la moitié des terres émergée telles que l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Inde, l'Australie, l'Antarctique... » [Blieck et Waterlot : 2012]) ont fourni des possibilités limitées aux espèces de bambou pour leur évolution et expansion.

Une exception peut tout de même être faite pour Madagascar (Illustration 11) où 33 espèces de bambou sont dénombrées. La quasi totalité, soit 32 espèces, est endémique : ce qui est très préoccupant pour leur préservation [Bystriakova et al. : 2003a].

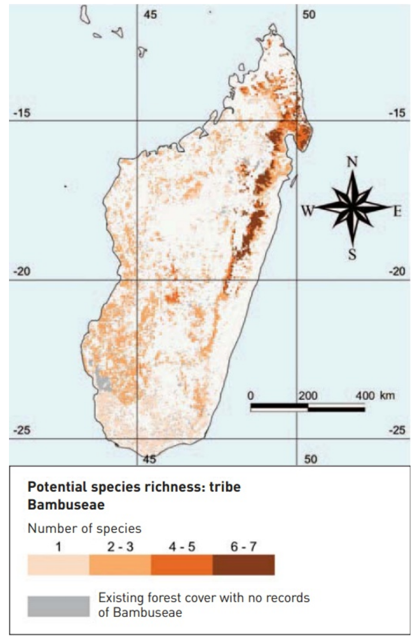


Illustration 11: Richesse taxonomique potentielle à Madagascar
[Bystriakova et al. : 2003a]

7. Culture

Il existe trois grandes catégories de culture du bambou que nous développerons brièvement dans ce point : la récolte en forêt, la culture individuelle et la plantation [Janssen : 2000].

- ***Récolte en forêt***

La grande majorité des ressources de bambou poussent en forêt. Historiquement, les personnes habitant à proximité de ces dernières y récoltaient le bambou pour leur usage personnel. Ces dernières années, avec la prise en charge des forêts par les états, l'usage de ces dernières est soumis à restrictions. Ce qui rend l'exploitation du bambou plus contraignante et donc moins attractive. De cette prise en charge découle un autre problème : plus personne ne se sent responsable de la gestion de la forêt (notion de Tragédie des communs [Abdelmalki et Mundler : 2010]). Les gens préfèrent exploiter le bambou le plus proche, ce qui conduit à une surexploitation des lisières et à un développement trop important du bambou au centre de la forêt, ce qui le rend petit à petit inaccessible.

L'extraction non correctement régulée des produits forestiers, comme le bambou, est considérée comme un facteur de destruction des forêts, au même titre que l'augmentation des surfaces agricoles nécessaires. Pour une bonne régulation, comme nous le verrons plus loin, il est nécessaire d'intégrer directement les communautés tributaires des ressources en bambou [Janssen : 2000].

- ***Culture individuelle***

La culture individuelle du bambou se fait sur de petites zones entretenues par de petits agriculteurs pour leur usage personnel. Seule une faible partie est vendue sur le marché local. Le rendement du bambou obtenu par culture individuelle est d'ailleurs nettement inférieur à celui des plantations. Sa réelle valeur réside surtout dans l'utilisation qu'en font les agriculteurs et leurs familles.

La gestion de ce type de culture pose généralement moins de problèmes puisque la personne qui l'exploite en est généralement propriétaire. Cependant, les méthodes de préservation sont plus traditionnelles que dans le cas d'une plantation. En effet, les méthodes plus modernes ne sont pas envisageables pour de petits producteurs. Une coopérative locale mettant à leur disposition l'équipement nécessaire peut toutefois représenter une solution [Janssen : 2000].

- ***Plantation***

Les plantations sont des activités commerciales à grande échelle qui sont la propriété d'entreprises ou de coopératives. Elles permettent également la création de nombreux emplois mais ces derniers peuvent être instables dans le cas d'une seule grande plantation appartenant à une entreprise. Il faut également ajouter à cela la méconnaissance de la floraison du bambou qui pourrait entraîner, si elle se produit, la destruction de toute la plantation. Ce qui aurait alors un gros impact sur l'économie locale.

Dans le cas d'une gestion par une coopérative, il y a généralement un meilleur équilibre entre la plantation et les besoins des populations locales et de l'environnement [Janssen : 2000].

C. PRINCIPALES UTILISATIONS

Une multitude d'utilisations sont répertoriées pour le bambou. Pour ce travail, elles sont classées en deux catégories. Tout d'abord, les utilisations naturelles, regroupant les différentes espèces animales dépendant du bambou. Ensuite, les utilisations anthropiques pour lesquelles une série d'exemples montrant la diversité des usages seront donnés.

1. Utilisations naturelles

Pour les différentes zones d'origine du bambou telles que définies au point précédent, il existe des espèces animales plus ou moins dépendantes du bambou. Voici, en fonction de ces zones, une présentation non exhaustive de ces espèces.

- ***Asie/Pacifique***

En Asie, l'espèce la plus connue et la plus emblématique est certainement le panda géant (*Ailuropoda melanoleuca*) dont l'alimentation est constituée à 99% de bambou. Son système digestif étant très semblable à celui d'un carnivore, il doit consommer une grande quantité de nourriture (17 kg de chaume ou 14 kg de feuilles ou 40 kg de pousses) pour assimiler une quantité suffisante de nutriments. Selon son statut de conservation, il est considéré comme une espèce en danger suite à la fragmentation de son habitat [National Zoo : s.d.] [Edinburgh Zoo : 2012].

Cependant, d'autres espèces comme le panda roux (*Ailurus fulgens*) ou l'ours noir d'Asie (*Ursus thibenatus*) dépendent également grandement du bambou. Il s'agit de deux espèces vulnérables.

La petite chauve-souris du bambou (*Tylonycteris pachypus*), une des plus petites au monde, niche dans les entre-nœuds du bambou. De plus, une quinzaines d'oiseaux asiatiques ainsi que plusieurs invertébrés se sont adaptés au bambou qui est devenu leur principal habitat.

- ***Amérique***

En Amérique du Sud , le bambou est également une source de nourriture et un habitat pour un grand nombre d'espèces. Plus spécifiquement en haute altitude, l'ours à lunette (*Tremarctos ornatus*), classifié comme vulnérable, et le tapir des montagne (*Tapirus pinchaque*), classifié comme en danger, se nourrissent occasionnellement de pousses de bambou.

A plus basse altitude, le tapir du Brésil (*Tapirus terrestris*), classifié vulnérable, se nourrit de plantes aquatiques et d'herbacées, dont une partie importante en feuilles et brindilles de bambou. Au moins quatre espèces de rongeurs appelés « rats du bambou » (*Dactylomys dactylinus, Dactylomys peruanus, Dactylomys boliviensis* et *Kannabateomys amblyonyx)* ont pour habitat principal les forêts de bambou dont ils se nourrissent également.

Comme pour la zone Asie/Pacifique, de nombreux oiseaux dépendent du bambou. De plus, l'eau qui peut s'accumuler dans les entre-nœuds de ce dernier fournit un habitat privilégié pour certains invertébrés et amphibiens.

Aux États-Unis également, les zones de plantation de bambou servent de refuge pour les oiseaux, notamment la paruline de Bachman (*Vermivora bachmani*), espèce en danger critique d'extinction [Bystriakova et al. : 2003a].

- ***Afrique***

Bien que sa diversité taxonomique dans cette région soit faible, le bambou y est un élément essentiel pour plusieurs espèces, spécialement en haute altitude pour deux espèces en danger critique d'extinction et une troisième en danger. Tout d'abord, au Kenya, le bongo des montagnes (*Tragelaphus eurycerus isaaci*) passe la saison sèche dans les forêts de bambou qui représentent une partie de son habitat. Ensuite, un peu plus à l'ouest, le gorille des montages (*Gorilla beringei beringei*) et le cercopithèque doré (*Cercopithecus kandti*) vivent eux aussi dans ces forêts de bambou qui sont également pour eux une source de nourriture (90% du régime alimentaire du gorille des montagnes dans certaines périodes et 60% de celui du cercopithèque doré)

A Madagascar, le bambou est fondamental pour plusieurs espèces. Notamment pour trois espèces d'hapalémurs (en anglais « lémurien du bambou ») qui se nourrissent principalement de jeunes pousses de bambou : l'hapalémur doré (*Hapalemur aureus*), l'hapalémur gris (*Hapalemur griseus*) et le grand hapalémur (*Hapalemur simus*). Selon l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN), le premier est en danger d'extinction et les deux autres en danger critique d'extinction. Enfin, une autre espèce endémique de Madagascar qui cette fois utilise le bambou pour y cacher ses œufs : la grenouille Mantella laevigata (*Mantella laevigata*) [Animal Info : 2005][Bystriakova et al. : 2003a] [Ducey : 2011].

2. Utilisations anthropiques

Outre son importance écosystémique, le bambou est également utilisé par l'homme : plus de 1500 usages sont à dénombrer. Notamment en Asie, où il joue une rôle important pour l'économie locale, mais également pour le commerce national et international. Au niveau mondial, dans les années 80, l'utilisation et le commerce du bambou étaient estimés à 4,5 milliards de US $/an (une publication de l'INBAR parle en 2000 de 10 milliards de US $/an [Janssen : 2000]). Il s'agit bien d'une estimation, puisque 80% du bambou est utilisé localement, c'est-à-dire sans véritable commerce : des valeurs exactes sont donc difficiles à obtenir

Aujourd'hui, la Chine est de loin le leader sur le marché et l'utilisation du bambou prend de plus en plus d'ampleur. Voici quelques exemples d'usages. Le but n'est pas d'en dresser une liste complète mais plutôt d'en montrer la diversité. Il convient également de ne pas oublier que pour un certain nombre de ces usages, le bambou suit un processus de transformation alors que pour d'autres, l'utilisation est plus brute [Daytonb, Hamesb, Scurlocka : 2000] [Feing Kwong Chan et Sanna : 2009] [Felten : 2003] [Pregaldini : s.d.].

- ***Artisanat***

Comme il a été mentionné, l'usage local du bambou est relativement important. Ces utilisations locales engendrent la fabrication d'une série d'objets du quotidien (mobilier, paniers, ...) regroupés ici sous la dénomination « artisanat ».

Encore une fois, il n'est pas raisonnablement envisageable d'établir une liste complète de tout ces produits. Nous nous limiterons donc à quelques exemples. Citons entre autres : la confection d'instruments de musiques conçus à partir de bambou, dont le Vahila (cithare tubulaire en bambou), instrument traditionnel malgache, la construction plus anecdotique de vélos (cadre en bambou) ou plus traditionnelle la fabrication d'ustensiles de cuisine ou de cannes à pêche [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b] [Feing Kwong Chan et Sanna : 2009].

Aujourd'hui, le bambou est également utilisé par de nombreux designers et les techniques plus récentes de transformation et de traitement du bambou permettent la fabrication de produits à haute valeur ajoutée comme les coques d'ordinateurs portables [ASUS : 2008].

- ***Alimentation***

Frites, mijotées, en ragoût, bouillies, en plat froid ou sous forme de soupe, les pousses de bambou peuvent être préparées de diverses façons. Grâce à leur composition, elles sont des aliments dignes d'intérêt. Tout d'abord, leur teneur en protéines plus élevée que celle de la plupart des légumes et leur composition raisonnable en acides aminés essentiels (sur les 18 acides aminés contenus dans le bambou, plus d'un tiers sont essentiels), non synthétisables par l'organisme humain, en font un aliment végétal nutritif. De plus, les pousses de bambou sont pauvres en matière grasse (valeur proche des autres légumes), ont une digestibilité élevée et sont répertoriées parmi les légumes riches en phosphore (en moyenne 60mg/100g). Enfin, puisque les pousses sont encerclées par une gaine, la partie comestible est difficilement accessible aux substances impures, faisant des pousses de bambou un légume très propre.

Les éléments nutritifs présents dans les pousses varient avec leur âge. Plus la pousse est âgée, plus la quantité de protéines diminue alors que les glucides et la densité de fibres augmentent, ce qui diminue sa comestibilité.

Aujourd'hui, la Chine, le Japon et l'Asie du Sud sont les trois principales zones de production de pousses de bambou dans le monde. La récolte des pousses doit se faire avant que ces dernières ne voient la lumière et a lieu sur une période très courte. Les conditions de conservation représentent donc un enjeu crucial afin d'éviter le vieillissement trop rapide des pousses.

Outre les pousses, les feuilles de bambou sont également utilisées à des fins alimentaires puisqu'elles peuvent servir à la fabrication d'alcool [Chaomao et Yuming : 2010].

- ***Bioénergie***

Compte tenu des grandes quantités de biomasse que le bambou peut produire, il constitue une source très intéressante de bioénergie. Différentes applications sont possibles.

Tout d'abord, son Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) est comparable ou supérieur à celui d'autres essences de bois, de l'ordre de 18 MJ/kg de matière sèche, pour un taux de cendres légèrement plus élevé (1 à 2% pour le bambou contre 0,5 à 1% pour le bois, 7 à 8% pour la paille). Le bambou peut donc être utilisé comme biomasse sous diverses formes (morceaux, granules, briquettes, ..) [Huart : 2012].

Une autre technologie intéressante à des fins énergétiques est la gazéification : le bambou est brûlé à des températures élevées (de l'ordre de 700 à 900°C) et se transforme en un mélange gazeux dont le PCI vaut 25 à 30% de celui du gaz naturel.

La pyrolyse[15] permet la production de bio-huile et de charbon de bois dans les proportions variants suivant la température [Charlot : s.d.].

La commission européenne a d'ailleurs financé un programme de recherche appelé « *Bamboo for Europe* » ayant entre autres pour but d'évaluer l'utilisation du bambou en Europe en terme de valorisation énergétique [Gielis : s.d.] [Van Den Bossche : 1996].

- ***Textile et papier***

L'industrie du textile et la fabrication du papier ont un point commun : l'utilisation de fibres. Avec ses avantages tels qu'une croissance rapide ou une résistance aux insectes (pas ou peu d'insecticide nécessaire), le bambou - ou plutôt les fibres issues du bambou – est une alternative intéressante.

Tout d'abord en ce qui concerne le papier, la fibre de bambou fonctionne de la même façon que la fibre de bois pour la fabrication de la pâte à papier et ne demande donc pas de modification du processus de fabrication. L'inconvénient majeur est le fait que le bambou contient beaucoup de silice. Si cela représente un avantage pour son utilisation en médecine, cela le rend plus difficile à découper et est dans ce cas un désavantage.

Pour ce qui est de l'utilisation du bambou dans l'industrie du textile, il convient de faire la différence entre deux produits : la viscose de bambou et les fibres de bambou. Si tous deux permettent la formation d'un tissu absorbant, anti-ultraviolet et antibactérien, les procédés d'élaboration sont fortement différents. Les premières sont obtenues par un procédé chimique similaire à celui employé pour la fabrication de la pâte à papier. Ce qui consomme d'énormes quantités d'eau et d'énergie. Les secondes sont obtenues de façon plus naturelle mais le procédé est lent et coûteux. Les textiles obtenus à partir du bambou sont donc dans 95% des cas fabriqués à partir de viscose de bambou [Bystriakova et al. : 2003b] [Feing Kwong Chan et Sanna : 2009] [Kallaway : 2010].

- ***Phytoremédiation***

La phytoremédiation est l'utilisation de plantes pour éliminer, contenir ou dégrader des contaminants environnementaux présents dans l'eau, le sol ou l'air. Le bambou semble un bon candidat pour la phytoremédiation pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, le bambou est naturellement résistant aux stress environnementaux (manque d'eau, inondations temporaires, variation de température, ...) ainsi qu'à de nombreux contaminants et par sa grande capacité à l'évapotranspiration, il permet de réduire le volume d'eau en fin de phytoremédiation. De plus, c'est une plante très productive (la biomasse d'une forêt de bambou mature peut atteindre 287 t/ha) qui trouve de nombreuses applications commerciales. Un autre aspect important est le vaste

15 « Décomposition thermique (pour des températures de 200°C à environ 1000°C) de matières organiques en l'absence d'oxygène ou en atmosphère pauvre en oxygène. » [EMSE : s.d.]

système racinaire des bambous qui augmente l'activité bactérienne du sol [Harding : s.d.].

Toutes ces caractéristiques intéressantes ont abouti à un procédé écologique développé par la société Phytorem : BAMBOU-ASSAINISSEMENT. Il s'agit de véritables stations d'épuration : grâce à l'importante activité bactérienne engendrée par les rhizomes, la matière organique est plus rapidement minéralisée et assimilée par les bambous. Les contaminants se retrouvent donc fixés dans le chaume qui, une fois coupé, est utilisé dans d'autres filières [PHYTOREM : 2008].

Outre ce procédé breveté, le bambou est également utilisé pour la dépollution de sol notamment en cas de pollution aux métaux lourds comme le plomb [Diep thi My Hanh : 2008].

- ***Médecine***

En plus de ses autres usages, le bambou possède des qualités médicinales considérables et variées. En effet, le bambou contient des fibres, du calcium, du phosphore, du fer, de la thiamine (vitamine B1), de la riboflavine (vitamine B2), de la niacine (vitamine B3) et de la vitamine C. Cela le rend très précieux en tant qu'élément curatif pour de nombreuses infections courantes [Coffey : s.d.].

Plusieurs parties du bambou peuvent être utilisées à des fins thérapeutiques : les jeunes pousses, les feuilles et l'exsudat[16] récolté aux nœuds des chaumes.

L'espèce de bambou utilisée dépendra des caractéristiques recherchées : des livres[17] détaillent ce sujet et il semble difficile d'établir ici une liste à la fois claire et brève. A titre d'exemple, le bambou noir (*Phyllostachys nigra*) peut être cité comme une des espèces largement utilisées en raison de ses propriétés variées. Elle est entre autres utilisée contre la toux, les inflammations pulmonaires, la fièvre ou encore pour stopper des saignements [Dharmananda : 2011].

L'exsudat de bambou est riche en matières minérales et en silice. Cela lui confère des propriétés telles que la stimulation de la synthèse du collagène par les tissus osseux ou la reconstitution du cartilage. Il prévient l'ostéoporose et diminue la dégénérescence articulaire (arthrose) [Duteil : 2012].

- ***Construction***

Le bambou étant à la fois léger et résistant, il présente un intérêt en tant que matériau de construction. En Asie, les chaumes servent couramment à la fabrication d'échafaudages, même pour des chantiers importants. Ils sont également employés pour la construction d'habitations ou de ponts ou pour la fabrication de béton armé.

Il existe aussi d'autres matériaux obtenus après transformation comme des planches de parquet, des cloisons, des poutres, ... Nous n'irons pas plus loin dans la description de ces produits pour le moment. En effet, une partie de ce travail étant dédiée au bambou dans la construction, plus de détails seront donnés à ce moment là [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b] [Feing Kwong Chan et Sanna : 2009].

16 « Liquide suintant naturellement ou accidentellement d'un végétal. » [Larousse : 2012]
17 Yang Yifang, **Chinese Herbal Medicines Comparisons and Characteristics**, 2002 Churchill Livingstone, London.

D. Phyllostachys edulis

Comme il a été dit, le nombre d'espèces de bambou est estimé à plus de 2000. Dans ce travail, nous nous concentrerons sur l'une d'entre elles : *Phyllostachys edulis*, que nous décrirons ici brièvement.

Ce choix d'espèce a été fait en fonction du matériau de construction étudié dans ce travail, le lamellé-collé de bambou, qui est fabriqué à partir de cette espèce.

1. Classification

L'espèce *Phyllostachys edulis*, plus simplement appelée bambou Moso ou bambou d'hiver, fait partie du genre Phyllostachys. Si, selon la classification, entre autres, du Système d'Information Taxonomique Intégré (SITI) au Canada ou du National Center for Biotechnology Information (NCBI) aux États-Unis, son nom scientifique accepté est *Phyllostachys edulis. Phyllostachys pubescens* (ainsi que *Phyllostachys heterocycla*) est un de ses autres noms qui se retrouve plus couramment dans la littérature [SITI : 2012] .

Les informations présentées dans cette partie du travail font donc référence à plusieurs noms qui ne correspondent en réalité qu'à une seule espèce. En raison de sa classification taxonomique relativement complexe, le fait qu'une espèce de bambou ait plusieurs noms est assez courant [USDA : s.d.].

2. Répartition

Le genre *Phyllostachys* est originaire d'Asie. En Chine, c'est un des principaux genres avec le *Dendrocalamus*. Sa répartition est présentée sur l'Illustration 12.

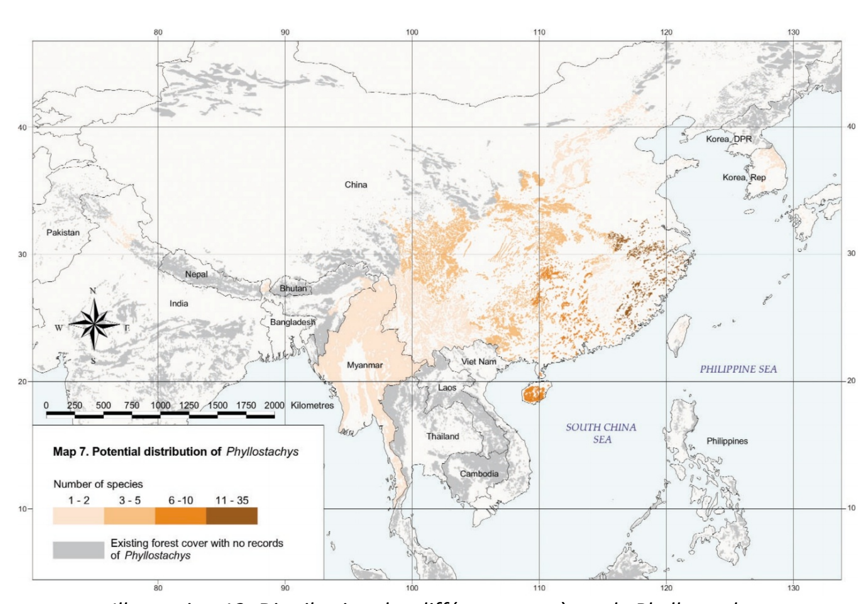


Illustration 12: Distribution des différentes espèces de Phyllostachys
[Bystriakova et al. : 2003b]

Originaire de Chine, le bambou Moso y est l'espèce la plus importante. Depuis les années 50, la superficie des terres qui lui sont consacrées a plus que doublé : de 1,5 millions d'hectares, elle en couvrait 5 millions en 2007 grâce à l'expansion naturelle et la plantation.

Son habitat naturel est situé approximativement entre 23°30' et 32°20' Nord et 104°30' et 122° Est. La zone principale des forêts de Moso se situe entre 25° et 30° Nord et 110° et 122° Est dans les provinces de Fujian, Hunan, Zhejiang et Jiangxi [Fu : 2001].

Comme le montre l'Illustration 13, l'espèce a été introduite et est cultivée dans d'autres pays d'Asie tempérée (au Japon et en Corée), ainsi qu'en Asie tropical (aux Philippines et au Vietnam). Pour sa bonne résistance à de faibles températures, cette espèce se retrouve également en Europe et aux États-Unis [Bystriakova et al. : 2003b] [Henley et Yiping : 2010].

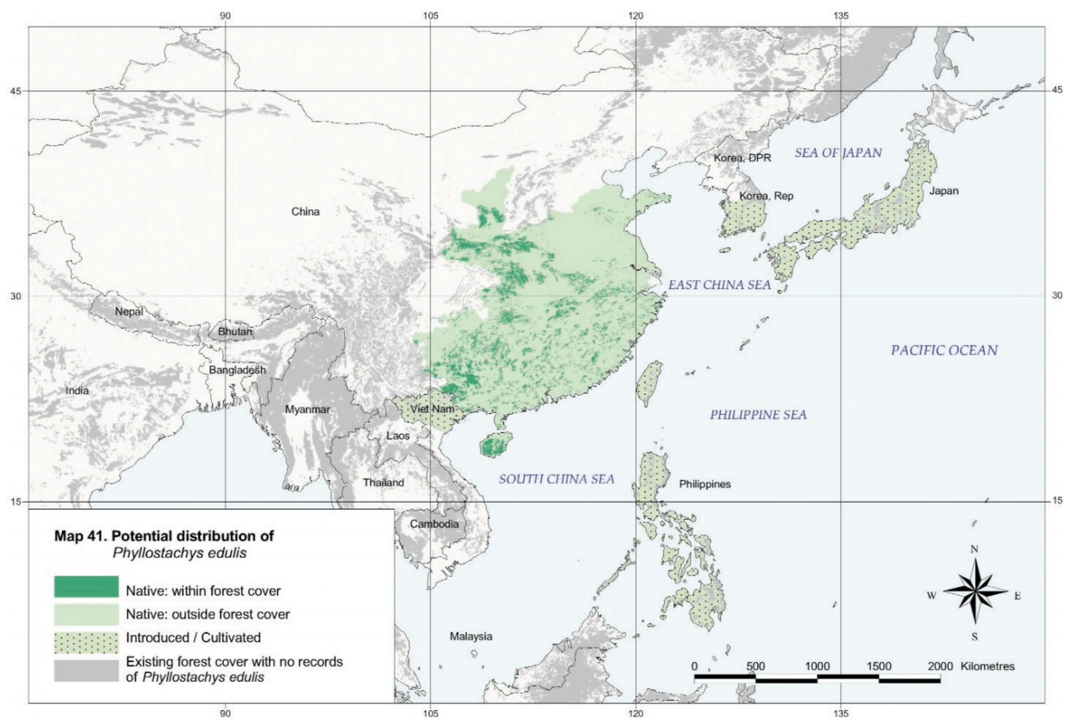


Illustration 13: distribution de Phyllostachys edulis [Bystriakova et al. : 2003b]

3. Description

Le bambou Moso est un bambou géant dont le chaume peut atteindre 15 à 28 m (la taille peut être réduite en cas de mauvaises conditions, comme par exemple de faibles températures) pour un diamètre de 15 à 20 cm (Illustration 14). Son feuillage dense est composé de petites feuilles vert pâle. Il s'agit d'une espèce traçante dont les rhizomes sont pachymorphes.



Illustration 14: Chaume de bambou Moso [Complete Bamboo : 2012]

Le Moso résiste à de faibles températures (jusqu'à -20°C) et a besoin de précipitations annuelles en suffisance (en tant de pousse, un niveau de précipitations de 400 à 600 mm est optimal) . Il s'agit là des deux facteurs restrictifs pour sa répartition géographique. La saison des pluies coïncide d'ailleurs avec la période de pousse du bambou [Fu : 2001].

L'intervalle de temps observé entre deux floraisons du Moso est d'au moins 67 ans [Buckingham et al. : 2010].

4. Utilisations

Cette espèce de bambou est perçue dans le monde comme ayant l'un des meilleurs potentiels commerciaux car elle est très appropriée pour la transformation industrielle. De plus, cette utilisation permet une collection plus efficace de données sur l'espèce, ce qui est, rappelons le, un des points faibles

majeurs du bambou [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

Le bambou Moso est utilisé pour différentes raisons [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b] :

- L'utilisation en tant que bois pour la fabrication de matériaux de construction, de meubles ou encore dans l'artisanat. En Chine, le bambou n'est d'ailleurs pas considéré comme une herbe ou un plante mais comme un arbre. Un des noms du Moso est d'ailleurs « Nam Zhu », Nam faisant référence à du bois.
- L'utilisation des pousses à des fins alimentaires. En effet, elles sont couramment consommées et constituent la majorité de l'exportation de pousses de bambou en Chine.
- Pour la conservation du sol et de l'eau ainsi que l'aménagement du territoire : le bambou, grâce à son système racinaire important, permet de fixer le sol et d'éviter les glissements de terrain.

E. Pressions sur les ressources de bambou

En ce qui concerne les pressions existant sur les ressources de bambou, elles peuvent être classées en deux catégories. D'une part, les pressions qui pourraient être qualifiées de « dommages collatéraux » dus à la déforestation. Et d'autre part, les pressions directes dues à l'intensification de l'exploitation des forêts de bambou.

1. Déforestation

A travers le monde, les différentes espèces de bambou vivent majoritairement dans des forêts. En tant que « plante forestière », le devenir du bambou est donc fortement lié à celui de la forêt dans laquelle il pousse. Cette vulnérabilité due à la déforestation s'ajoute à une des caractéristiques majeures du bambou : sa floraison, qui provoque la mort simultanée d'une même espèce.

De nombreuses espèces de bambou se trouvent sur la liste rouge des plantes menacées de l'UICN, et d'autres pourraient être classées comme rares. Il faut également ajouter à cela, vu la difficulté à classifier les bambous et la difficulté d'accès à certaines forêts, que certaines espèces pourraient disparaître avant même qu'elles n'aient été identifiées [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b].

2. Intensification et politique de gestion durable

Comme déjà mentionné au point précédent, dans son milieu naturel, le bambou pousse dans des forêts : il est donc mélangé avec des arbres, des arbustes et d'autres herbes. Ces forêts mixtes représentent un habitat pour de nombreuses espèces, créant de véritables écosystèmes. L'intensification de l'activité forestière liée au bambou transforme ces forêts mixtes en monocultures, détruisant ainsi ces écosystèmes.

Outre une diminution de biodiversité, la monoculture engendre notamment une diminution de la résistance aux menaces externes comme des insectes ravageurs (la présence d'oiseaux vivant dans les forêts mixtes régulait la prolifération des insectes) ou les mauvaises conditions météorologiques (la présence de grands arbres protégeait plus efficacement les écosystèmes). Un tableau (Tableau 2) récapitulatif de l'INBAR présente différentes répercussions de la monoculture du bambou.

Tableau 2: Effets des changements de gestion (forêt mixte vers monoculture) [Henley et Yiping : 2010]

Effet sur....	Description
...la biodiversité	Diminution des espèces d'oiseaux (par comparaison avec des forêts mixtes à proximité des monocultures)
	Baisse du nombre d'espèces de bactéries (-90%) et de champignons (-45%) sur une période d'étude de 11 ans.
	Réduction de la diversité d'espèces d'arbustes et d'herbes
...la résistance de la plantation	Augmentation (de 12 à 35%) des dégâts occasionnés par de mauvaises conditions météorologiques
	Susceptibilité accrue aux infestations
	Sol de moins bonne qualité (aération, porosité,...) et contenant moins de nutriments
...la productivité	Diminution de la productivité de l'ordre de 25% sur une période d'étude de 11 ans.
	Baisse de la qualité des chaumes (diamètre moins important) et de la production de biomasse.

De ce fait, si la monoculture permet une augmentation de la productivité à court terme, en raison de ces

répercussions, il y aura une baisse de productivité sur le long terme. Ce qui représente un risque pour le secteur du bambou. Une politique de gestion durable des ressources est donc essentielle.

Il s'agit d'ailleurs de l'objectif poursuivit par l'INBAR qui soutient une gestion qui procure des avantages économiques raisonnables à court et long terme grâce au maintien de la biodiversité des forêts. Nous prendrons l'exemple de la Chine, grand producteur de bambou, pour lequel un projet de gestion durable a été mis en œuvre [Bystriakova et al. : 2003a] [Bystriakova et al. : 2003b] [Henley et Yiping : 2010].

- ***Cas de la Chine***

En raison du peu de ressources disponibles par personne, la Chine a une politique d'exploitation forestière limitant l'exploitation de certaines espèces et incitant à l'exploitation du bambou, considéré comme un arbre. Ceci explique l'augmentation exceptionnelle ces 50 dernières années des forêts de bambou Moso, espèce phare du pays. Cette intensification engendre une baisse de biodiversité qui, si rien n'est mis en œuvre, pourrait conduire à la perte de ce secteur prometteur qu'est l'exploitation du bambou.

En 2007, sur base de la politique forestière en place et d'analyses de modèles, l'INBAR propose à 3 provinces chinoises productrices de bambou 10 recommandations, réparties en 5 catégories, en vue d'améliorer la biodiversité des forêts de bambou (Tableau 3, à titre indicatif). Certaines portent sur une application plus rigoureuse des législations existantes, d'autres préconisent des changements par l'introduction de nouveaux mécanismes.

Tableau 3: Recommandations pour une meilleure gestion des forêts de bambou *[Henley et Yiping : 2010]*

Catégories de recommandation	Recommandations spécifiques
Clarifier le rôle des organismes gouvernementaux et améliorer la coordination inter-institutionnelle pour les questions relatives à la biodiversité	1.1 Clarifier le système de gestion et les mécanismes de protection à tous les niveaux de l'administration
Réexaminer la position du bambou dans la législation forestière existante et le système de classification	2.1 Examiner l'inclusion des forêts de bambou et du bambou dans les politiques forestières, et les recatégoriser si nécessaire.
	2.2 Promouvoir la gestion multifonctionnelle des forêts de bambou
Formuler des politiques spécifiques pour la gestion du bambou	3.1 Mettre en place une politique de gestion des ressources et de culture du bambou
	3.2 Améliorer l'appui technologique et la recherche sur la diversité des forêts de bambou
	3.3 Améliorer le système d'investissement pour la conservation de la biodiversité des forêts de bambou
Clarification et Renforcement des droits de propriété et d'usage	4.1 Renforcer la gestion des droits de propriété sur les forêts de bambou et clarifier les règles pour la réquisition des terres forestières par l'État
Intégrer d'avantage les communautés locales et le grand public dans les initiatives de protection de la biodiversité des forêts de bambou	5.1 Mettre en place un mécanisme de participation de la communauté pour la protection de la biodiversité des forêts de bambou
	5.2 Améliorer le mécanisme de compensation des bénéfices écologiques pour les forêts (et les forêts de bambou)
	5,3 Renforcer la publicité et l'éducation sur la conservation de la biodiversité dans les forêts de bambou.

- ***Recommandations générales***

Le lien entre biodiversité et productivité qui est fait en Chine peut également être fait dans d'autres pays. De manière générale, la politique forestière en place joue un rôle de première importance dans la gestion des ressources de bambou. Malgré qu'elles aient été spécifiquement développées pour la Chine, des recommandations sont également applicables dans un contexte international. Elles peuvent être regroupées en 4 points [Henley et Yiping : 2010].

➔Réexaminer la classification du bambou dans la législation forestière existante

Compte tenu de son statut local, le bambou est considéré différemment par les pays : parfois comme un arbre comme c'est le cas en Chine, et parfois comme une culture agricole. Cela ne pose pas problème si les caractéristiques écologiques et sectorielles sont prises en compte. Dans le cas contraire, il y a risque que des politiques inappropriées entravant le développement durable du secteur ne soient mises en place. Cette classification doit être reconnue dans les politiques et lois pertinentes. De plus, la multiplicité des fonctions du bambou est primordiale : attribuer un seul « but » aux forêts de bambou est inapproprié.

➔Formuler des politiques spécifiques pour la gestion de bambou

Des lignes directrices claires sur la gestion du bambou doivent être fournies afin d'assurer la bonne santé des forêts et la pérennité des ressources de bambou. Les organismes travaillant spécifiquement sur le bambou peuvent aider à la formulation de ces politiques. Le cas échéant, le transfert des connaissances sur les modèles de gestion respectueux de la biodiversité de la Chine est possible.

➔Clarifier et renforcer les droits de propriété et d'usage

Comme avec les autres ressources naturelles, les agriculteurs investiront plus facilement dans leurs forêts de bambou sur le long terme s'ils ont des garanties en terme de sécurité de leur emploi et des droits d'utiliser, de gérer et de transférer les ressources. Les lois concernant l'utilisation des ressources communes doivent explicitement faire référence aux ressources de bambou, et fournir des orientations sur leur gestion. Ces lois devraient inclure les droits d'utilisation ainsi que les responsabilités en ce qui concerne la biodiversité des écosystèmes liés au bambou.

➔Intégrer davantage les communautés locales et le public dans la protection de la biodiversité dans les forêts de bambou

Il faut mettre l'accent sur l'éducation, afin que les effets négatifs à long terme de la perte de biodiversité soient connus des communautés agricoles responsables des forêts de bambou.

Lorsque des restrictions sont nécessaires pour mettre en œuvre les méthodes de gestion, une compensation adéquate doit être fournie.

F. CONCLUSION

Comme l'a montré cette première partie, le bambou, par sa croissance rapide et ses propriétés techniques rivalisant avec celles du bois, peut être considéré comme une ressource naturelle ayant un potentiel élevé. Ses usages, en constante expansion grâce aux nouvelles technologies, dans des domaines aussi variés que l'alimentation ou la construction en font un élément indispensable au développement humain. Le bambou est également précieux à l'environnement, que ce soit comme habitat ou source de nourriture pour de nombreuses espèces avec lesquelles il forme de véritables écosystèmes ou comme élément de contrôle de l'érosion du sol grâce à son complexe racinaire étendu.

Présentes sur tous les continents exceptés l'Europe et l'Antarctique, les forêts de bambou ont une valeur économique inestimable pour les populations locales. Cependant, l'exploitation intensive du bambou engendre des pertes majeures de biodiversité dont découle une baisse de productivité. Pour y remédier, l'utilisation d'engrais semble une bonne solution, mais cela ne fera que reporter le problème. A long terme, ce qui peut réellement être appelé l'industrie du bambou s'étoufferait d'elle-même. Une meilleure solution se trouve certainement dans des politiques forestières de gestion durable des forêts de bambou, qui permettront à la fois une exploitation plus saine et un maintien des ressources disponibles.

Maintenant que le contexte a été défini et que l'intérêt du bambou est établi, nous pouvons nous focaliser sur une application particulière du bambou : les matériaux de construction.

LE BAMBOU COMME MATÉRIAU DE CONSTRUCTION

L'EXEMPLE DU LAMELLÉ-COLLÉ

A. INTRODUCTION

Après une description générale, cette partie sera consacrée à l'utilisation du bambou dans le secteur de la construction pour les pays occidentaux.

Tout d'abord, nous présenterons les avantages ainsi que les inconvénients que peut présenter l'utilisation de ce matériau. Nous parlerons également des solutions qui peuvent être apportées pour pallier à certains inconvénients.

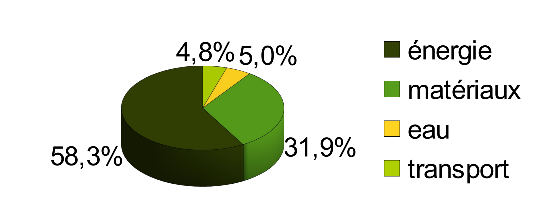
Ensuite, nous décrirons les grandes utilisations du bambou et nous nous concentrerons sur les poutres de bambou lamellé-collé qui font l'objet de ce travail.

B. LE BAMBOU DANS LA CONSTRUCTION

1. Avantages et inconvénients du bambou pour la construction

- ***Avantages***

Une étude néerlandaise (Graphe 3) [Klaase, van den Dobbelsteen et van der Linden : 2002] a montré que les impacts environnementaux d'un bâtiment étaient majoritairement dus à la consommation d'énergie et aux matériaux de construction (60% des impacts dus aux matériaux concernent la structure porteuse du bâtiment). Grâce aux améliorations en terme d'efficience énergétique, la part d'impacts occasionnés par l'énergie diminue. Pour continuer à diminuer les impacts, il convient donc de s'intéresser de plus près aux matériaux.



Graphe 3: Répartition des impacts environnementaux d'un bâtiment [Klaase, van den Dobbelsteen et van der Linden : 2002]

Si des solutions doivent être envisagées en terme de recyclage et réemploi, l'utilisation de matériaux issus de ressources renouvelables et durables peut également être une voie à suivre. En plus des aspects financiers et techniques, la durabilité et l'impact environnemental deviendraient des critères de choix. C'est dans ce contexte que l'utilisation du bambou prend tout son sens [Janssen, van den Dobbelsteen et van der Lugt : 2005].

Comme nous l'avons vu, le bambou présente une structure naturellement tubulaire qui lui confère de bonnes performances mécaniques. Sa forte teneur en silice lui donne une certaine dureté sans qu'il soit pour autant cassant en raison de sa composition fibreuse qui lui donne de l'élasticité. Cette dernière propriété en fait un bon matériau de construction en zone sismique [Gilet : s.d.] [Janssen, van den Dobbelsteen et van der Lugt : 2005].

Contrairement à une forêt traditionnelle qui demande un délai d'au moins 15 ans (mais 20 à 40 ans pour les espèces les plus courantes), le bambou est mature après 3 à 4 ans. De plus, une plantation bien entretenue (avec une récolte sélective) peut fournir du bambou chaque année puisque de nouveaux chaumes se régénèrent à partir des rhizomes. Cela permet aux producteurs d'avoir un lieu de travail fixe et limite les problèmes d'érosion engendrés notamment en exploitation forestière par la mise à nu du terrain lors de la coupe des arbres [Gilet : s.d.] [Landouer : s.d.].

En comparaison avec le bois, mis à part sa croissance plus rapide, le bambou possède d'autres avantages. En effet, il peut pousser dans des zones où l'exploitation forestière n'est pas possible comme par exemple sur des pentes érodées. [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2010].

D'un point de vue plus large, grâce à des propriétés telles que la résistance et la croissance rapide, le bambou pourrait représenter une alternative aux bois tropicaux. Cela permettrait d'enrayer la disparition des forêts tropicales tout en stimulant l'économie locale [Gilet : s.d.] [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2010].

- ***Inconvénients***

Si l'utilisation du bambou présente des avantages, il y a également quelques inconvénients dont les principaux sont : les irrégularités, la structure du chaume et le manque de connaissances.

Tout d'abord, puisqu'il s'agit d'un matériau naturel, il ne peut y avoir deux chaumes identiques. Cela demande un contrôle plus important et parfois des démarches plus complexes, notamment par des tests complémentaires, pour la réalisation d'un projet.

Un second problème découle de ce qui est l'un des principaux attraits du bambou : sa structure tubulaire. En effet, cette dernière rend la jointure complexe. Des techniques très diversifiées sont mises en œuvre : assemblage à l'aide de rotin ou de fil de fer ou encore par injection de béton dans le chaume. Une publication de l'INBAR [Janssen : 2000] établit une classification de ces différentes techniques.

Enfin, puisque l'utilisation du bambou dans la construction n'est pas encore très développée et que les connaissances à son sujet sont encore très restreintes, elle demande souvent une main d'œuvre spécifique et étrangère. Ce qui, en plus d'éventuels problèmes de communication dus à la différence de langue, peut engendrer un coût plus important [Gilet : s.d.] [Janssen, van den Dobbelsteen et van der Lugt : 2005].

- ***Solutions***

Pour pallier à ces inconvénients, des produits dérivés sont élaborés.

En ce qui concerne les irrégularités, un bon contrôle du produit à la source sera toujours essentiel puisque le bambou restera un matériau naturel. La fabrication de matériaux à base de lamelles de bambou, comme les poutres en lamellé-collé dont nous parlerons plus loin, peut cependant permettre de réduire les irrégularités.

Pour la structure du bambou, il est encore plus difficile d'y remédier. Si il est possible d'obtenir des

sections rectangulaires en forçant les chaumes durant leur croissance par des sortes de moules, cela augmente considérablement les coûts de production. Travailler avec des matériaux à base de lamelles peut également être une solution mais les propriétés allouées par la section tubulaire seront alors perdues.

La technologie ne pourra jamais pallier au manque de connaissances vis-à-vis du bambou. Cependant, la transposition des techniques utilisées avec le bois pour le bambou peut permettre un meilleur contrôle. En effet, la plupart des procédés industriels du bois sont applicables au bambou. De plus, depuis 1997, l'INBAR développe des « international building code » mais, comme vu dans la première partie de ce travail, beaucoup de choses sont encore à faire en terme de classification des espèces [Janssen, van den Dobbelsteen et van der Lugt : 2005].

2. Utilisations possibles

Dans ce point, nous présenterons des matériaux de construction faits à base de bambou.

- ***Chaumes***

Si les chaumes possèdent de nombreuses utilisations dans les pays producteurs de bambou comme l'élaboration d'échafaudages ou la construction de maisons (un milliard de personnes vivent dans des maisons en bambou), c'est moins le cas dans les pays occidentaux [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2010].



Illustration 15: Bamboo Pavillon [Schleifer : 2011]

Des exemples existent, mais il s'agit souvent de constructions architecturales et provisoires comme le *Bamboo Pavillon* (Illustration 15), théâtre en plein air construit à Berlin pour le *Festival of Vision* en 2000 [Schleifer : 2011].

- ***Contreplaqué***

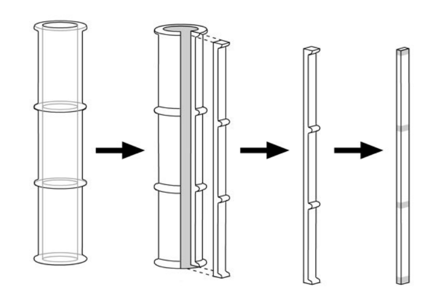


Illustration 16: Lamelles de bambou
[Bamboo Flooring : s.d.]

Le contreplaqué existe en différentes épaisseurs, couleurs et textures. Il est fabriqué à base de lamelles de bambou obtenues par découpe des chaumes comme le montre schématiquement l'Illustration 16. La couleur est fonction du traitement appliqué aux lamelles de bambou lors de la fabrication. La texture dépend quant à elle de la méthode d'agencement des lamelles :

- À l'horizontale (« *plain pressed* » en anglais) : les lamelles sont placées à plat, collées ensemble sous haute pression. Les nœuds du bambou sont très visibles (zones plus foncées) (Illustration 17).

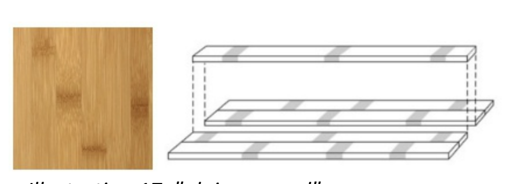


Illustration 17: "plain pressed" [Moso bamboo : s.d.]
[Bamboo Flooring : s.d.]

- À la verticale (« *side pressed* » en anglais) : les lamelles sont placées latéralement et collées ensemble sous haute pression. Les nœuds du bambou sont cette fois moins visibles (Illustration 18).

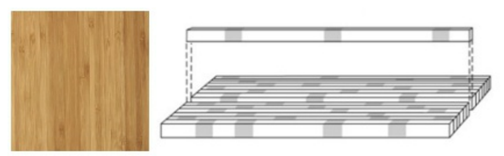


Illustration 18: "side pressed" [Moso bamboo : s.d.] [Bamboo Flooring : s.d.]

[Moso bamboo : s.d.] [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009] [Bamboo Flooring : s.d.]

- ***Strand Woven Bamboo (SWB)***

Le SWB est un matériau d'aspect semblable à du bois, fabriqué par encollage et compression de lamelles de bambou. Il sert à la fabrication de planches mais également de parquet.

Nous verrons plus en détail son processus de fabrication dans la suite de travail.

- ***Bamboo Mat Board (BMB)***





Illustration 19: Nattes de bambou (gauche) et BMB (droite) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

Le BMB est une sorte de contreplaqué fabriqué à partir de couches successives de nattes de bambou collées et pressées (Illustration 19). Les nattes sont obtenues par tissage de fines lamelles de bambou, ce qui rend le procédé plus difficile à mécaniser [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009] [Janssen : 2000] [IPIRTI : s.d.].

- ***Bambou et béton***

Le bambou est également utilisé en association avec le béton.

Un premier exemple d'association est l'utilisation directe des chaumes pour renforcer des dalles de béton (Illustration 20). Des progrès sont encore à apporter au niveau de l'interaction béton/bambou qui devrait être améliorée pour augmenter la résistance de la dalle [Ghavami : 2004].

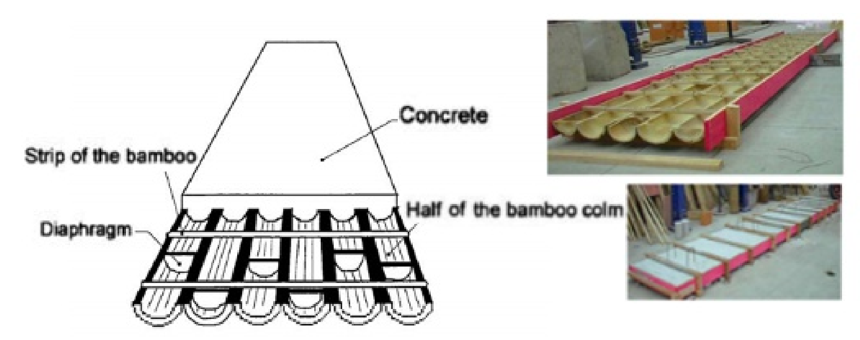


Illustration 20: Renforcement dalle béton [Ghavami : 2004]



Illustration 21: Armatures en bambou [Khare : 2005]

Il est également possible d'utiliser les lamelles de bambou comme armatures (Illustration 21). Des tests ont d'ailleurs montré qu'elles pouvaient potentiellement être utilisées comme substitut des armatures d'acier mais avant tout pour des constructions à petite échelle [Khare : 2005] [Ghavami : 2004] .

En effet, les poutres armées de bambou auront des déformations plus importantes que celles armées

d'acier (en raison du plus faible module d'élasticité du bambou). L'adhérence béton/bambou joue également un rôle limitant. Pour améliorer cette dernière, il convient d'avoir des lamelles bien sèches, comportant des nœuds et ayant subi un traitement (par exemple un sablage) rendant leur surface moins lisse [Boucher : 2006].

Une troisième application possible est l'utilisation de fibres de bambou dans les ciments renforcés par des fibres naturelles [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Renforcement sol***

Le bambou peut également servir pour le renforcement du sol. Si la plante, grâce à son système de rhizomes, permet de stabiliser les berges et talus, des nattes de bambou et des chaumes sont également utilisés respectivement comme géotextile[18] ou comme pieux afin de maintenir la cohésion du sol et de prévenir ainsi d'éventuels glissements de terrain [Janssen : 2000].

18 « Produit textile, souvent non-tissé, utilisé dans le génie civil pour y assurer les rôles d'anticontaminant, de drain, de filtre ou d'armatures . » [Larousse : 2012]

C. Le lamellé-collé

1. Généralités

Le dénominatif « lamellé-collé » est un terme général regroupant différents types d'éléments obtenus suivant un même procédé de fabrication, à partir de lamelles de bois. Le plus généralement, les essences utilisées sont le sapin, l'épicéa, le pin sylvestre ou le douglas.

- ***Fabrication***

Pour ce qui est de la fabrication des poutres, les lamelles de bois d'une épaisseur maximale de 50 mm et d'une longueur allant de 1,5 à 5 m, une fois triées suivant leurs caractéristiques techniques, sont, si nécessaire, séchées jusqu'à atteindre un taux d'humidité de 12%. Elles sont ensuite calibrées et purgées de leurs défauts avant d'être solidarisées par des entures[19] et collées les unes dernière les autres jusqu'à obtenir une lamelle continue de la longueur désirée : c'est la phase d'aboutage. Viennent ensuite l'encollage et le pressage, afin de former la section de poutre voulue. Comme pour le contreplaqué de bambou, les lamelles peuvent être collées de deux façons différentes : le collage horizontal (Illustration 22 - à gauche) et le collage vertical (Illustration 22 - à droite). Enfin, après rabotage, les poutres subissent des traitements de finition et de préservation pour d'assurer leur durabilité (résistance aux insectes et aux champignons) [IRABOIS et CTBA : 2003] [Goubie et Söderlind : 2012] [Franssen : 2007].

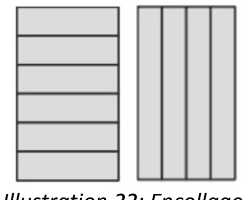


Illustration 22: Encollages [IRABOIS et CTBA : 2003]

- ***Avantages***

Du procédé de fabrication des poutres en lamellé-collé découlent certains avantages par rapport aux poutres en bois massif.

Tout d'abord, puisqu'elles sont fabriquées par assemblage d'éléments, il n'y a pas de restrictions dues à la dimension des morceaux de bois comme c'est le cas pour les poutres en bois massifs, limitées par la taille des arbres. Dans ce cas, la limitation se trouve plutôt au niveau du transport entre l'usine de fabrication et le chantier de construction.

Ensuite, le mode de fabrication du lamellé-collé permet à la fois d'obtenir des poutres avec contre-flèches[20] ou à inertie variable[21] (Illustration 23) ainsi que des formes très variées allant de simples poutres courbes à des dédoublements, voir même des sections circulaires (Illustration 24).

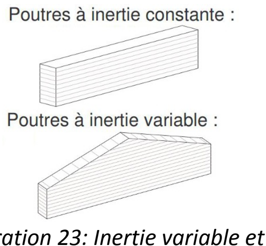


Illustration 23: Inertie variable et constante [IRABOIS et CTBA : 2003]

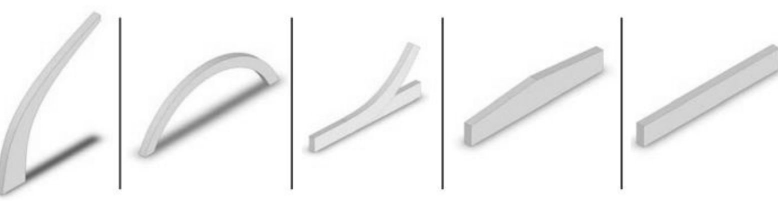


Illustration 24: Différentes formes de poutres lamellé-collé [Goubie et Söderlind : 2012]

---

19 « Toute combinaison d'assemblage de pièces de bois bout à bout. » [Larousse : 2012]

20 « Courbure préalable donnée a un élément (poutre, dalle) lors de sa fabrication, dans le sens opposé à la déformation prévue, de façon que, après mise en charge, cette dernière reste admissible. » [Roy et Blin-Lacroix : 2011]

21 « Grandeur physique utilisée en mécanique, caractérisant la répartition de la masse d'un solide par rapport a un axe. » [Roy et Blin-Lacroix : 2011]

Enfin, l'élimination des imperfections du bois (comme les nœuds) lors de la fabrication permet d'obtenir un matériau plus homogène ayant des performances supérieures à celles du bois massif.

Il y a également lieu de mentionner la bonne résistance au feu des poutres lamellé-collé.

[IRABOIS et CTBA : 2003] [Goubie et Söderlind : 2012] [Franssen : 2007]

- ***Caractéristiques***

Suivant que les lamelles utilisées soient toutes de la même classe de résistance ou de classes différentes (une classe plus résistante aux endroits de la poutre les plus sollicités : les parties extérieures), le lamellé-collé sera respectivement qualifié de « homogène » (Illustration 25 – à gauche) ou de « panaché » (Illustration 25 – à droite).

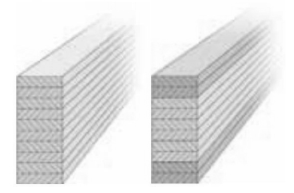


Illustration 25: Lamellé-collé homogène et panaché
[Gamme : 2010]

Pour notre travail, à titre de comparaison avec le lamellé-collé bambou, nous considérerons une GL24h[22] (homogène) dont les caractéristiques techniques sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 4).

Tableau 4: Caractéristiques techniques d'une poutre GL24h [IRABOIS et CTBA : 2003]

Désignation	**Symbole** suivant Eurocode 5[23]	**Unité**	**GL24h**
Résistance à la flexion	$f_{m,k}$	N/mm²	24
Résistance à la traction (axiale)[24]	$f_{t,0,k}$	N/mm²	16,5
Résistance à la traction (transversale)	$f_{t,90,k}$	N/mm²	0,4
Résistance à la compression (axiale)	$f_{c,0,k}$	N/mm²	24
Résistance à la compression (transversale)	$f_{c,90,k}$	N/mm²	2,7
Module d'élasticité	E_0	N/mm²	11 600

La masse volumique du lamellé-collé est comprise, quelle que soit la classe de résistance, entre 350 et 500 kg/m³.

[Goubie et Söderlind : 2012] [IRABOIS et CTBA : 2003] [Franssen : 2007]

2. Lamellé-collé en bambou

Après la description du lamellé-collé bois, nous pouvons maintenant passer au matériau qui fait l'objet de ce travail : le bambou, et plus précisément le bambou lamellé-collé. Pour ce faire, nous nous basons sur les données d'une société qui propose des poutres lamellé-collé en bambou sous l'appellation anglaise Glulam Bamboo : 3B Structure. Ces poutres sont produites en Belgique par l'entreprise Ecolam installée à Ciney, en Province de Namur [3B structure : s.d.].

- ***Fabrication***

Pour notre analyse, nous considérons que les poutres lamellé-collé bois et bambou possèdent le même processus de fabrication. Nous ne le décrirons donc pas dans ce point. La grande différence est que, contrairement au bois, ce n'est pas un produit brut qui est utilisé mais du SWB dont nous avons déjà parlé

---

22 Notation pour classe de résistance du bois lamellé-collé . Le classement s'effectue en fonction de la résistance caractéristique en flexion, qui est ici de 24 N/mm². [Matriche : 2011]

23 Le dimensionnement de la poutre se basant sur l'Eurocode 5, nous en utilisons ici les symboles. Ceux-ci ont la même signification que ceux vu précédemment : σ faisant référence aux contraintes et f à la résistance. Ces deux valeurs sont liées, comme nous l'avons défini, sachant que la résistance correspond à la contrainte maximale admissible par le matériau.

24 Axiale = parallèle aux fibres / Transversale = perpendiculaire aux fibres.

précédemment et dont le processus de fabrication est détaillé au point suivant.

- ***Caractéristiques***

Alors que le bambou possède déjà des caractéristiques techniques supérieures à celles du bois (Tableau 1), le SWB, obtenu à partir de bambou comprimé, ajoute à cela de la dureté et une densité supérieure. Cela se répercute directement sur les caractéristiques mécaniques du lamellé-collé en bambou présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 5) en comparaison avec les caractéristiques d'une poutre GL24h.

Tableau 5: Caractéristiques techniques d'une poutre lamellé-collé bambou [CSTC : 2010]

Désignation	Symbole suivant Eurocode 5	Unité	GL24h	Bambou
Résistance à la flexion	$f_{m,k}$	N/mm²	24	115
Résistance à la traction (axiale)	$f_{t,0,k}$	N/mm²	16,5	100
Résistance à la traction (transversale)	$f_{t,90,k}$	N/mm²	0,4	3,65
Résistance à la compression (axiale)	$f_{c,0,k}$	N/mm²	24	95
Résistance à la compression (transversale)	$f_{c,90,k}$	N/mm²	2,7	33
Module d'élasticité	E_0	N/mm²	11 600	19 000

La masse volumique est également supérieure et vaut 1100 kg/m³.

Ces caractéristiques plus élevées permettent, comme nous le verrons par la suite, d'utiliser des poutres avec des sections réduites, ce qui représente un gain de matière et de place [3B structure : s.d.].

3. Fabrication SWB

Comme il a été dit, le lamellé-collé en bambou est fait à base de planches de SWB. Voici donc les différentes étapes de production de ces planches.

- ***Culture et récolte du bambou en plantation***

Pour notre étude, nous considérons une plantation gérée durablement n'utilisant ni engrais, ni pesticides [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]. Nous estimons qu'il y a environ 3300 chaumes/ha. Il s'agit d'une valeur moyenne atteinte par une plantation d'au moins 10 ans [Buckingham et al. : 2010].

La récolte des chaumes matures (environ 8 m de long pour une épaisseur variant de 9 mm (base) à 5 mm (partie supérieure)), faite à la tronçonneuse, permet d'obtenir chaque année 750 chaumes/ha (Illustration 26) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].




Illustration 26: Récolte des chaumes de bambou [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

L'âge des chaumes peut être déterminé grâce à leur couleur. En effet, plus le chaume est vieux plus il sera mat. Cette distinction devient cependant de plus en plus difficile à faire pour les chaumes plus âgés. Pour éviter toute confusion, les chaumes sont donc marqués d'un code indiquant leur année d'émergence. Cette méthode est toutefois assez fastidieuse puisqu'elle demande une inspection régulière de la plantation [UNIDO : 2012a].

- ***Découpe des chaumes en lamelles***




Illustration 27: Découpe des lamelles [Hargot : 2009] [123 Bamboo : s.d.]

Dans un premier temps, les chaumes sont découpés en 4 parties de 2 m. Comme l'épaisseur varie, le nombre de lamelles par segment varie. Pour le premier segment 12 lamelles de 6 mm peuvent être découpées (elles seront par la suite dédoublées en 24 lamelles de 3 mm). Pour le second, 10 lamelles de 6 mm sont obtenues (elles seront également dédoublées). Enfin, pour les troisième et quatrième, la découpe permet d'obtenir respectivement 8 et 6 lamelles de 3 mm. Ce qui donne un total de 58 lamelles par chaume.

Les chaumes sont découpés à l'aide d'une machine avec une lame en étoile, comme le montre l'Illustration 27 [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Rectification des lamelles (rabotage)***

Les lamelles sont rabotées afin d'éliminer la « peau » et les parties trop peu fibreuses . Cette rectification rend les lamelles plus uniformes, ce qui facilite les procédés suivants (Illustration 28) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

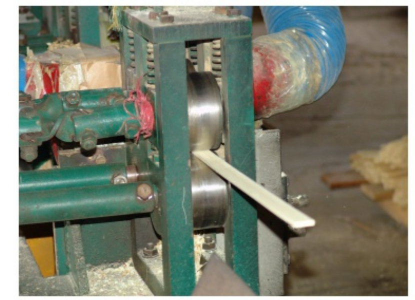



Illustration 28: Rectification des lamelles [Hargot : 2009] [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

- ***Dédoublement des lamelles de plus grande épaisseur***

Les lamelles les plus épaisses (6 mm) sont dédoublées [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Traitement de préservation par autoclave***





Illustration 29: Traitement par autoclave [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

Les lamelles subissent un traitement thermique à haute pression en autoclave[25] en deux étapes durant chacune 150 à 170 minutes (Illustration 29). Sous haute pression (0,21 à 0,25 MPa) et température (120 à 130°C), les sucres présents dans les lamelles vont fondre : c'est le processus de carbonisation. Après traitement, les lamelles résisteront mieux aux insectes (avides de sucre et d'amidon dont le bambou est composé) et ont une couleur caramel [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009] [Hargot : 2009].

25 « Récipient à parois épaisses et à fermeture hermétique, destiné à réaliser sous pression soit une réaction industrielle, soit la cuisson ou la stérilisation à la vapeur. » [Larousse : 2012]

- ***Séchage***



Illustration 30: Chambre de séchage [UNIDO : 2012b]

Les lamelles sont ensuite envoyées en chambre de séchage (Illustration 30) à 50-60°C. Cette étape permet de garantir une bonne stabilité dimensionnelle des lamelles [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009] [Hargot : 2009] [UNIDO : 2012b].

- ***Préparation lamelle pour encollage***




Illustration 31: "crushing" des lamelles [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

Pour permettre une meilleure adhésion de la colle et faciliter la compression des lamelles, ces dernières sont légèrement broyées (en anglais :« crushing ») (Illustration 31) [Hargot : 2009].

- ***Encollage et pressage des lamelles***





Illustration 32: Pressage des lamelles [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

Les lamelles sont trempées dans de la colle urée phenol formaldéhyde. La quantité de colle utilisée correspond à 15,1% en masse de la poutre (pour une poutre de 1kg, il faudra 0,151 kg de colle) pour les produits à utilisation intérieure et de 23% en masse pour une utilisation extérieure.

Elles sont ensuite placées dans un moule qui est placé dans une presse froide de 2200 tonnes durant 5 minutes (Illustration 32) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Activation colle***

Après le pressage, les poutres (toujours dans leur moule) sont placées dans un four à 140-150°C pendant 8 heures pour que la colle prenne [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Sciage poutre***





Illustration 33: Sciage des poutres [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

Une fois la prise de la colle terminée, les poutres sont sorties de leur moule. Afin d'éliminer les impuretés de moulage, elles sont sciées aux dimensions finales (Illustration 33) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

- ***Sciage et ponçage des planches***

Enfin, les planches sont sciées à partir des poutres et poncées (Illustration 34) [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].




Illustration 34: Sciage des planches [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

D. Conclusion

Dans cette seconde partie, nous avons discuté des avantages que représente l'utilisation du bambou dans le secteur de la construction des pays occidentaux. Nous avons pu mettre en évidence une série d'inconvénients et présenter quelques solutions pour y remédier.

Ensuite, nous avons pu montrer différentes utilisations possibles du bambou. De manière générale, il semble que le bambou soit majoritairement utilisé pour des éléments de construction non portants comme les parquets. Ce qui est fort dommage vu les résultats encourageants présentés dans certaines études. Cela peut encore une fois s'expliquer par le manque de disponibilité des données et des informations sur le bambou, ainsi que par le peu d'entreprises proposant de tels produits. Les efforts de l'INBAR pour collecter et mettre à la disposition de tous un maximum de renseignements sur le bambou pourrait doucement faire évoluer les choses.

Enfin, nous nous sommes concentrés sur le matériau sur lequel nous avons choisi de porter notre analyse : les poutres en bambou lamellé-collé. Ces dernières semblent proposer des caractéristiques techniques très intéressantes sur base d'une matière première, le bambou, qui présente, comme nous l'avons vu dans la première partie, de nombreux avantages par rapport au bois.

Dans le contexte actuel du développement durable et de l'écoconstruction, les poutres en bambou semblent donc détenir de nombreuses clés pour devenir un matériau du futur. Mais ce matériau est-il pour autant « écologique » ? Les impacts générés par sa production sont-ils si négligeables qu'il y parait ? Les poutres de bambou lamellé-collé sont-elles meilleures, environnementalement parlant, que les poutres traditionnelles en bois lamellé-collé ? Nous tenterons de répondre à ces questions dans la troisième partie de ce travail.

ACV COMPARATIVE POUTRE LAMELLÉ-COLLÉ BAMBOU ET BOIS

A. INTRODUCTION

Afin de répondre aux questions amenées précédemment et de déterminer si les poutres en bambou lamellé-collé peuvent représenter une alternative environnementale à celles en bois, nous avons décidé d'opter pour une analyse de cycle de vie comparative. Cette troisième partie est donc consacrée à cette analyse.

Dans un premier temps, nous présenterons brièvement les principes de l'ACV ainsi que la base de données et le logiciel utilisés pour notre analyse.

Dans un second temps, nous appliquerons ces principes à une analyse comparative entre les deux poutres. Nous présenterons les différentes hypothèses, le système à étudier et ses limites ainsi que les différentes données utilisées.

Enfin, nous présenterons les résultats obtenus et tenterons d'apporter des améliorations afin de réduire les impacts.

B. L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE - THÉORIE

1. Origine et bref historique

Les premiers articles parlant d'ACV datent de la fin des années 60. C'est également à ce moment qu'a lieu une prise de conscience de la société par rapport à la pollution de l'environnement et à la limitation des ressources. C'est également à ce moment que sort le rapport du Club de Rome de 1972 (« Halte à la croissance ») qui met en évidence les limites du développement. À partir de là, les premiers bilans environnementaux vont voir le jour. En effet, afin de déterminer sur quels problèmes il y a lieu de se concentrer, l'homme a besoin d'un outil d'aide à la décision, rôle que l'ACV pourra remplir.

Mais le changement ne fut pas immédiat. Si des analyses existaient déjà en ce qui concerne l'énergie, elles vont progressivement être étendues aux ressources, émissions et déchets. Les analyses sont d'abords utilisées dans un but comparatif (par exemple, afin de déterminer quel est le meilleur produit), mais peu à peu l'importance d'aborder le cycle de vie d'un produit et ses alternatives devient un problème. En effet, vu l'absence d'un cadre théorique, il existe alors beaucoup d'approches différentes donnant des résultats tout autant différents. Un standardisation s'avérait être nécessaire.

Trois principaux organismes sont à la base de cette standardisation de l'ACV. Tout d'abord, l'Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization - ISO) qui élabore des normes dont un certain nombre sur l'environnement et le management environnemental, puis sur les ACV elles-mêmes. En 2006, date de dernière mise à jour des normes sur les ACV, la norme 14 040, donnant les lignes directrices, les principes et le cadre d'un ACV, ainsi que la norme 14 044, regroupant les normes 14 041 à 14 043 qui détaillent les différentes étapes de l'ACV (inventaire, évaluation et interprétation), sont publiées. Ensuite, du point de vue scientifique, au début des années 90, la Société de

Toxicologie et Chimie Environnementale (SETAC) crée une plate forme d'échange d'informations. Depuis 2002, la SETAC, en collaboration avec l'UNEP, dirige un cadre institutionnel pour le développement de l'ACV basé sur les normes ISO : l'Initiative pour le Cycle de vie [Jolliet et al. : 2005] [Goedkoop et al. : 2010] [Guinée et al. : 2011].

2. Principe général

L'ACV est une méthodologie permettant d'évaluer les impacts environnementaux potentiels associés à un produit sur toute la durée de son cycle de vie (autrement dit : de l'extraction des matières premières à sa fin de vie).

Les normes ISO définissent son déroulement en 4 étapes (Illustration 35) [ISO : 2006a] :

Illustration 35: Étapes d'une ACV [ISO : 2006a]

- ***Définition des objectifs et du champ d'étude***

Cette première phase est importante pour la qualité de l'étude : le problème doit y être clairement posé. En fonction du but recherché (comme par exemple : le choix entre différents procédés de fabrication pour déterminer le moins coûteux (évaluation en amont), la mise en évidence des impacts pour un procédé spécifique (évaluation en aval) ou encore la comparaison entre plusieurs objets), de la situation (temporelle et géographique) et du commanditaire de l'étude, les limites du système à analyser et les hypothèses pourront être très différentes.

C'est également ici que sera définie l'unité fonctionnelle : unité de référence (grandeur mesurable) choisie pour l'ACV sur laquelle tous les flux (énergie, utilisation matières premières, émissions polluants et l'utilisation du sol dans le cas d'analyses liées à la foresterie ou l'agriculture) des différents processus vont être rapportés. Dans le cas d'une analyse comparative, il est important de se baser sur une même fonction pour le choix de l'unité fonctionnelle.

Par exemple, la comparaison de deux peintures A et B se fera non pas sur base des pots de peinture mais plutôt sur la quantité nécessaire pour recouvrir une certaine surface. L'unité fonctionnelle sera alors la fonction « quantité pour recouvrir 1 m² de mur », qui pourra correspondre à 80 ml pour la peinture A et 70 ml pour la peinture B. Pour les processus de mélange de la peinture, les flux entrants seront entre autres : l'énergie nécessaire au mélange, les pigments et le liant et les flux sortants entre autres : la peinture et les différentes émissions. Ces valeurs peuvent bien entendu être différentes pour les 2 peintures. Dans le cas de la peinture A, les émissions seront rapportées pour une quantité de 80 ml.

C'est dans cette partie que vont se trouver aussi bien le scénario de base que les améliorations proposées au cours de l'ACV [Jolliet et al. : 2005] [Goedkoop et al. : 2010] [Degrez : 2012].

- ***Analyse de l'inventaire du cycle de vie[26] (ICV)***

Cette étape, comme son nom l'indique, reprend un inventaire des différents flux du système défini au point précédent.

Un système comporte généralement plusieurs processus pour lesquels il faudra donc établir les flux entrants (input) et sortants (output). Il peut arriver que certains processus produisent plusieurs produits[27] ou remplissent plusieurs fonctions. Il est alors nécessaire de répartir les impacts sur les différents produits : c'est ce qu'on appelle l'allocation des impacts. Face à cette situation, les normes ISO recommandent dans l'ordre [ISO : 2006b] :

- Éviter l'allocation en subdivisant le processus afin que chaque sous-processus n'ait qu'une sortie unique. Mais cela n'est pas toujours possible, comme dans le cas du bois et de la sciure qui ne peuvent être dissociés.

  Une autre méthode pour éviter l'allocation est l'extension des limites du système. Prenons l'exemple de l'analyse d'un produit A engendrant, dans son processus de fabrication, la production d'un coproduit B (Illustration 36). Si il existe un produit B' connu similaire à B et que B peut se substituer à B', par extension du système, les émissions et l'utilisation de matières premières pour B' sont donc réduites. Le système A peut donc être crédité pour une valeur correspondant à cette réduction. Cette méthode s'applique également à l'utilisation du coproduit afin de produire de l'électricité ou de la chaleur.

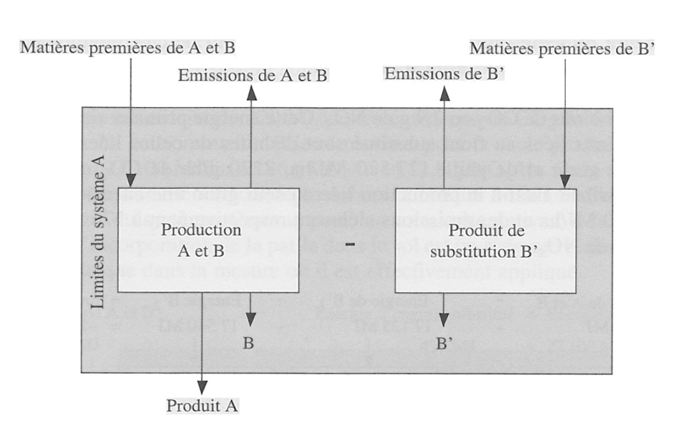


Illustration 36: Principe de l'allocation par extension du système
[Jolliet et al. : 2005]

  L'extension des limites du système doit être mise en pratique avec beaucoup de précautions. En effet, même si il existe un produit de substitution et que ses émissions sont connues, il faut que cette substitution soit l'usage le plus probable du coproduit. Le choix du coproduit de substitution est crucial : plus le produit de substitution choisi sera défavorable pour l'environnement, plus les résultats de l'ACV seront influencés positivement, ce qui peut déformer les résultats.

- Si il n'est pas possible de l'éviter, l'allocation se fera sur base d'une causalité physique : par exemple, proportionnellement à la masse ou au contenu énergétique du produit et des coproduits. Ainsi, si la sciure de bois représente 10% de la masse totale, l'allocation des impacts sera de 10%.

- Si l'allocation sur base d'une causalité physique n'est pas applicable, elle se fera suivant une

26 « L'ICV est un bilan complet des flux entrants et des flux sortants, c'est-à-dire des ressources énergétiques, matières premières et transports nécessaires pour fabriquer un produit ou un système. » [Actu-environnement : 2012]

27 Le mot produit est ici employé comme terme général. Il comprend en réalité LE produit (qui doit être comptabilisé dans l'ACV) ainsi que des coproduits ou déchets.

répartition proportionnelle à la valeur économique des produits. Cette méthode permet de distinguer les déchets à éliminer ou à recycler des coproduits.

Pour en revenir à l'inventaire, si son principe est simple, la récolte des données l'est beaucoup moins : cela demande un travail long et minutieux. Dans certains cas, il est possible de recourir à des bases de données comme Ecoinvent qui recense un certain nombre de processus et matériaux. Il faut cependant noter que les informations fournies par ces bases de données sont génériques et ne font pas référence à un processus ou matériau particulier comme ce serait le cas pour des données obtenues sur le terrain. Cela peut avoir plus ou moins d'importance en fonction des objectifs de l'ACV. Par exemple, il ne serait pas judicieux d'utiliser des données génériques sur les voitures pour une ACV sur un modèle particulier [Jolliet et al. : 2005] [Goedkoop et al. : 2010] [Degrez : 2012] [Finnveden et al. : 2009].

- ***Évaluation des impacts***

Cette étape se déroule en trois temps (Illustration 37):

1. La classification : les différentes émissions issues de l'inventaire sont assignées à différentes catégories d'impacts, « catégories groupant les substances répertoriées dans l'inventaire ayant des effets similaires (par exemple tous les flux de substances qui influencent la concentration d'ozone stratosphérique) » [Jolliet et al. : 2005]. Il faut souligner qu'une même émission peut se trouver dans plusieurs catégories d'impacts.

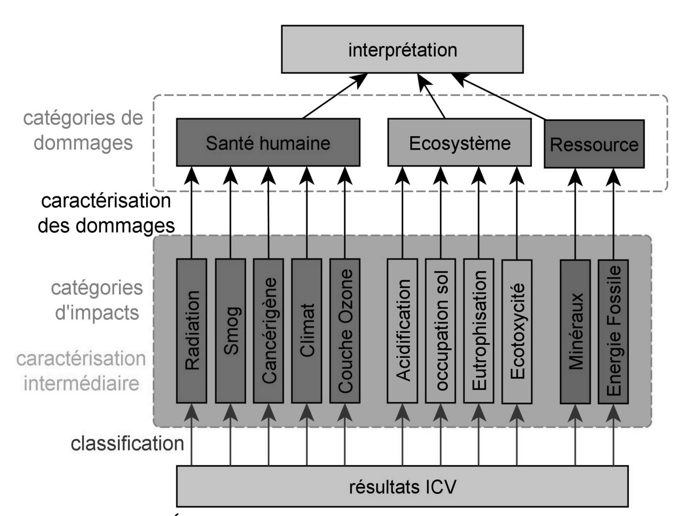


Illustration 37: Évaluation des impacts - *inspiré de [Goedkoop et al. : 2010]*

2. La caractérisation intermédiaire : chaque émission est pondérée en fonction de sa contribution dans chaque catégorie d'impacts. Par exemple, pour le réchauffement climatique, le CH_4 a 25 fois plus d'impact que le CO_2. Le CH_4 aura donc un facteur 25 et le CO_2 un facteur 1.

3. La caractérisation des dommages : les catégories d'impacts sont regroupées dans des catégories de dommages, « catégories groupant les dommages sur différents sujets à protéger comme la santé humaine, les écosystèmes, ... » [Jolliet et al. : 2005].

Il peut également y avoir une normalisation, permettant de montrer l'importance des catégories de dommages vis-à-vis du problème environnemental global, ou une pondération sociale, en fonction de l'importance donnée par la population aux catégories d'impacts [Jolliet et al. : 2005] [Goedkoop et al. : 2010].

- ***Interprétation***

Les résultats, une fois interprétés, permettent de mettre en évidence les processus critiques qui devraient nécessiter des améliorations prioritaires.

Il ne faut pas non plus perdre de vue les incertitudes, les limites du système ainsi que les hypothèses posées en début d'analyse.

De plus, comme le montre l'Illustration 35, les résultats sont également mis en relation avec les autres étapes. L'ACV est donc un processus itératif qui va être affiné progressivement en fonction des améliorations proposées. Il faut cependant faire la différence entre les hypothèses de départ et celles ajoutées en cours d'ACV [Jolliet et al. : 2005] [Goedkoop et al. : 2010] [Degrez : 2012].

C. Outils utilisés

1. Base de données

La base de données utilisée est Ecoinvent dans sa version 2.

Les origines d'Ecoinvent remontent à la fin des années 90. A ce moment, de nombreuses bases de données ont été développées par des organismes et instituts indépendants. Comme les ICV ne coïncidaient pas, les résultats d'une ACV dépendaient fortement de l'organisme qui s'en chargeait. L'intérêt croissant pour les ACV s'accompagnant d'une demande de qualité et de transparence, le Swiss Center for Life Cycle Inventories combina ses différentes bases de données afin d'unifier les ICV. La première version de Ecoinvent est publiée en 2003, la seconde en 2007 (la version 3 est attendue pour 2012).

Elle contient plus de 4000 inventaires de cycle de vie (ICV) dans des domaines très variés comme l'énergie, les matériaux de construction, le transport, les produits chimiques, le traitement des déchets et bien d'autres. Ces ICV sont basés sur des données industrielles et ont été compilées par des instituts de recherche et des consultants en ACV. Des lignes directrices de qualité ont été établies afin d'assurer la cohérence des données en termes de flux et de désignation des polluants comme les métaux lourds [Goedkoop et al. : 2010] [ecoinvent Centre : s.d.] [Frischknecht et al. : 2007].

2. Logiciel

Afin d'évaluer les impacts, nous utiliserons le logiciel Simapro dans sa version 7. Ce logiciel est employé dans de nombreux pays pour effectuer des ACV.

Il permet de construire de manière intuitive et flexible le système à analyser. Le menu général de Simapro est structuré suivant les différentes étapes de l'ACV telles qu'énoncées dans la norme ISO 14 040 (Illustration 38).

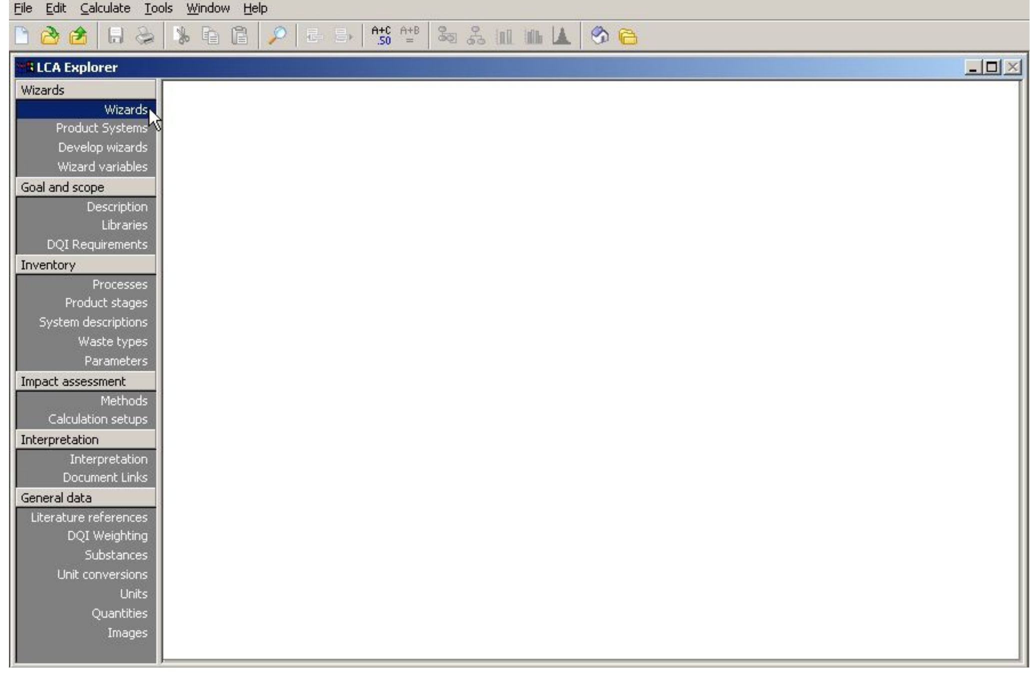


Illustration 38: Menu général Simapro

- ***Goal and scope***

Cet onglet permet entre-autres de sélectionner la ou les bases de données qui seront utilisées dans le projet. Comme nous venons de le dire, nous utiliserons la base de données Ecoinvent.

- ***Inventory***

Cet onglet contient, dans le sous-onglet « Processes », les différents processus qui se trouvent classés en différentes catégories comme les matériaux, l'énergie, le transport,... Ces catégories sont elles-mêmes divisées en sous-catégories.

Simapro offre différentes options. L'utilisateur peut :

- Directement utiliser les processus se trouvant dans l'inventaire, il s'agit alors de valeurs issues de bases de données.
- Modifier, après en avoir fait une copie, un processus pris dans une base de données.
- Créer de toute pièce de nouveaux processus à partir de ses propres données.

- ***Impact assessment***

Cet onglet permet de choisir la méthode d'impacts utilisée pour l'évaluation. Il est également possible de créer sa propre méthode. Nous utiliserons la méthode IMPACT 2002+ que nous décrirons plus loin.

- ***Évaluation et résultats***

Pour l'évaluation des impacts, Simapro permet le calcul d'un ou plusieurs processus suivant qu'il s'agisse d'une ACV simple ou comparative.

Les résultats sont affichés dans une nouvelle fenêtre. Simapro fournit une série d'informations :

- Le réseau reliant les différents processus suivant les impacts. Pour plus de clarté, seuls les processus ayant les contributions les plus importantes sont affichés. L'utilisateur peut augmenter ce nombre.
- Les résultats donnés à la fois par catégories d'impacts et par catégories de dommages. Les valeurs sont disponibles pour les étapes de caractérisation, normalisation et pondération[28].
- L'inventaire des différentes substances. Pour plus de lisibilité, il est possible de ne garder que les substances ayant une contribution supérieure à un certain pourcentage fixé par l'utilisateur.
- La contribution des différents processus. Comme pour l'inventaire, l'utilisateur peut éliminer les processus ayant les contributions les plus faibles.

Les résultats peuvent être exportés sous forme de feuilles de calcul Excel ou directement en format image pour les graphes.

[PRé Consultants : s.d.]

28 Ces étapes, déjà mentionnées précédemment (page 39), seront expliquées en détail lors de la description d'IMPACT 2002+ (page 56).

D. Définition des objectifs et du champ de l'étude

1. Objectif

- ***<u>But de l'ACV</u>***

Le but de cette ACV est de montrer l'intérêt que pourrait présenter l'utilisation du lamellé-collé en bambou.

L'objectif étant de comparer les impacts environnementaux d'une poutre lamellé-collé en bambou à ceux d'une poutre lamellé-collé en bois, nous procéderons donc à une ACV comparative.

Pour ce qui est du lamellé-collé bambou, nous modéliserons le processus. Tandis que pour le lamellé-collé bois, nous utiliserons les valeurs présentes dans la base de données (en procédant à quelques adaptations si nécessaire afin de rester cohérent vis-à-vis de nos hypothèses).

- ***<u>Public cible</u>***

Les résultats de cette ACV serviront avant tout à appuyer, ou non, la question de recherche qui concerne l'intensification de l'exploitation du bambou en vue d'une utilisation plus importante dans les pays occidentaux.

Néanmoins, ces résultats peuvent également s'adresser d'une part à l'entreprise produisant le lamellé-collé bambou et d'autre part aux entreprises de lamellé-collé bois.

2. Champ de l'étude

- ***<u>Hypothèses générales</u>***

Avant d'entamer la définition du système que nous allons étudier, il est nécessaire de poser quelques hypothèses qui nous serviront par la suite :

(1) Les différentes données utilisées se basent sur une étude réalisée par l'Université de Delft et publiée dans un rapport de l'INBAR [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]. Ce rapport se base sur des questionnaires et des interviews téléphoniques d'acteurs actifs dans la chaîne de production de matériaux en bambou. Il utilise également des données ajustées d'une ACV réalisée précédemment par un des auteurs (P. Van der Lugt). L'étude utilise une méthode d'évaluation par Eco-costs[29].

(2) Pour l'analyse, nous considérerons que l'étape de fabrication proprement dite des poutres en lamellé-collé est identique, qu'il s'agisse de bambou ou de bois. Nous considérerons les impacts comme similaires et ne modéliserons donc pas cette partie. Nous ne tiendrons également pas compte des phases d'usage et de la fin de vie, il s'agira donc d'une ACV partielle du type « cradle to gate [30]».

29 Méthode qui exprime le montant des dommages environnementaux sur base de la prévention de ces derniers. Il s'agit des moyens financiers qui devraient être déployés pour réduire la pollution de l'environnement et l'épuisement des matières premières afin d'atteindre un niveau conforme à la charge admissible par la Terre. [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009]

30 Littéralement « *du berceau à la porte* » : ACV partielle prenant en compte les impacts depuis l'extraction des ressources (*berceau*) jusqu'à l'usine de fabrication (*porte*). Les phases d'utilisation et de fin de vie sont omises.

Nous comparerons donc les impacts pour la quantité de planches de bois à ceux générés pour la quantité de planches de bambou pour l'obtention d'une poutre ayant une certaine résistance (plus de détails sur ce point se trouvent dans la détermination de l'unité fonctionnelle).

(3) Vu le manque d'informations disponibles concernant la majorité des machines (mis à part leur puissance), la décision a été prise de ne pas les prendre en compte dans l'étude. En ce qui concerne le transport, l'analyse considère cependant les camions car les données étaient suffisantes. Nous adapterons donc le module bois pour qu'il soit également conforme à cette hypothèse.

(4) La production de SWB ayant lieu en Chine, nous avons opté, en ce qui concerne l'électricité consommée par les différentes machines, pour le mix énergétique[31] chinois. Dans un scénario alternatif, nous adapterons ce mix énergétique dans le cas hypothétique d'une entière fabrication en Europe.

- ***Unité fonctionnelle***

Puisque le but de cette ACV est de comparer deux poutres de matériaux ayant des caractéristiques techniques différentes, nous allons déterminer les dimensions de deux poutres dimensionnées pour une même charge.

Ce dimensionnement se déroulera en deux étapes. Tout d'abord, nous choisirons les dimensions d'une poutre en lamellé-collé bois supportant un plancher pour laquelle nous déterminerons une certaine charge admissible (1). Ensuite, nous dimensionnerons la poutre en bambou à partir de cette charge, en modifiant uniquement la base de la poutre (2). Les calculs sont détaillés dans l'Annexe A.

Nous considérons une poutre GL24h ayant les dimensions suivantes : 0,2 x 0,6 x 12 m

(1) Les charges permanentes agissant sur cette poutre sont :

- Le poids propre : 0,456 kN/m
- Le poids du plancher : 1,25 kN/m

Les dimensions de la poutre permettent, pour répondre aux critères ELU et ELS[32], une charge variable de 0,75 kN/m.

(2) Pour la poutre en bambou, en appliquant :

- Le poids du plancher : 1,25 kN/m
- La charge variable : 0,75 kN/m

Par calcul itératif, les dimensions de poutre obtenues sont : 0,15 x 0,6 x 12 m

L'unité fonctionnelle est donc une poutre supportant son poids propre, un plancher et une charge

31 « Mélange d'électricité provenant de différentes sources (fossiles, nucléaire, hydraulique,...) et de différentes technologies. » [Jolliet et al. : 2005]

32 État limite : « état dans lequel la structure n'est plus apte à remplir l'usage ou la fonction auxquels on la destine. On distingue les États Limites Ultimes (ELU : ruine, effondrement, structure hors d'usage) et les États Limites de Service (ELS : structure inutilisable ou dangereuse en service, mais récupérable ou réparable). » [Frey : 2006]

variable de 0,75 kN/m. Ce qui donne pour les deux poutres :

	Bois	Bambou
Dimensions [m x m x m]	0,2 x 0,6 x 12	0,15 x 0,6 x 12
Masse [kg]	550	1188

- ***Système à étudier et frontières***

En référence au point de la partie précédente présentant les étapes de fabrication de la poutre en bambou lamellé-collé, le système à étudier se présente comme suit (Illustration 39). Les produits sont indiqués en jaune et les processus en vert.

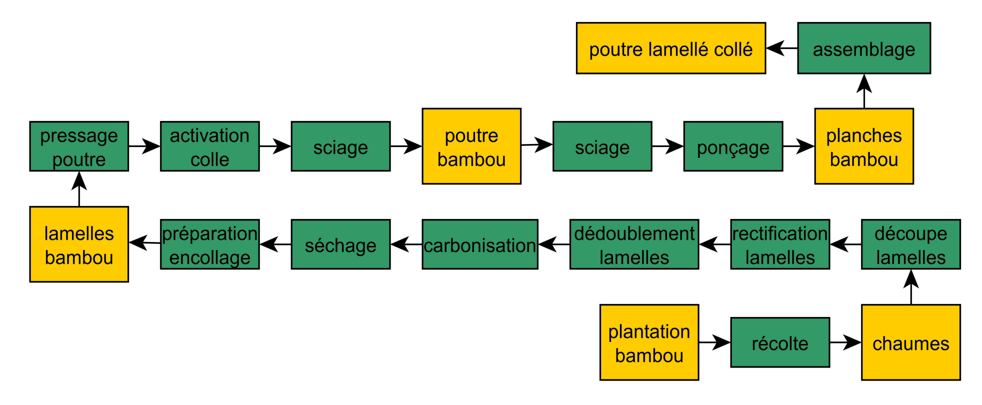


Illustration 39: Étapes fabrication poutre lamellé-collé en bambou

Conformément au rapport de l'INBAR, il est nécessaire d'ajouter deux phases de transport (vert clair) : la première pour les chaumes entre la plantation et l'usine et la seconde pour les planches entre la Chine et l'Europe (Illustration 40).

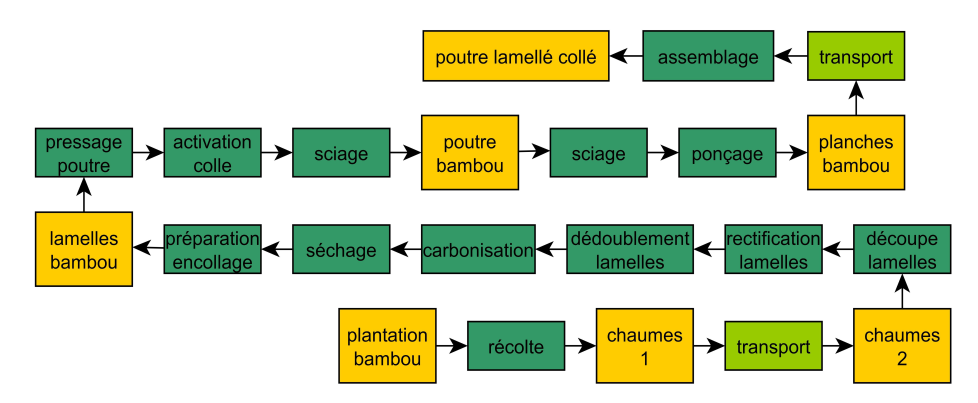


Illustration 40: Étapes fabrication poutre lamellé-collé en bambou et transport

Toujours suivant les données du rapport de l'INBAR, il faut compléter ce schéma (Illustration 41) avec l'énergie consommée (en mauve) et les différents flux entrants (en bleu - dans notre cas il s'agit uniquement de colle) ainsi qu'avec les déchets générés (en orange). Certains de ces déchets vont être réutilisés dans le cycle de production. C'est la cas des sciures récupérées lors du sciage des planches qui seront brûlées dans une chaudière (également alimentée en électricité) afin de produire une partie de la chaleur nécessaire aux processus de carbonisation et de séchage.

Comme expliqué en hypothèse (3), les machines ne seront pas inclues dans le système.

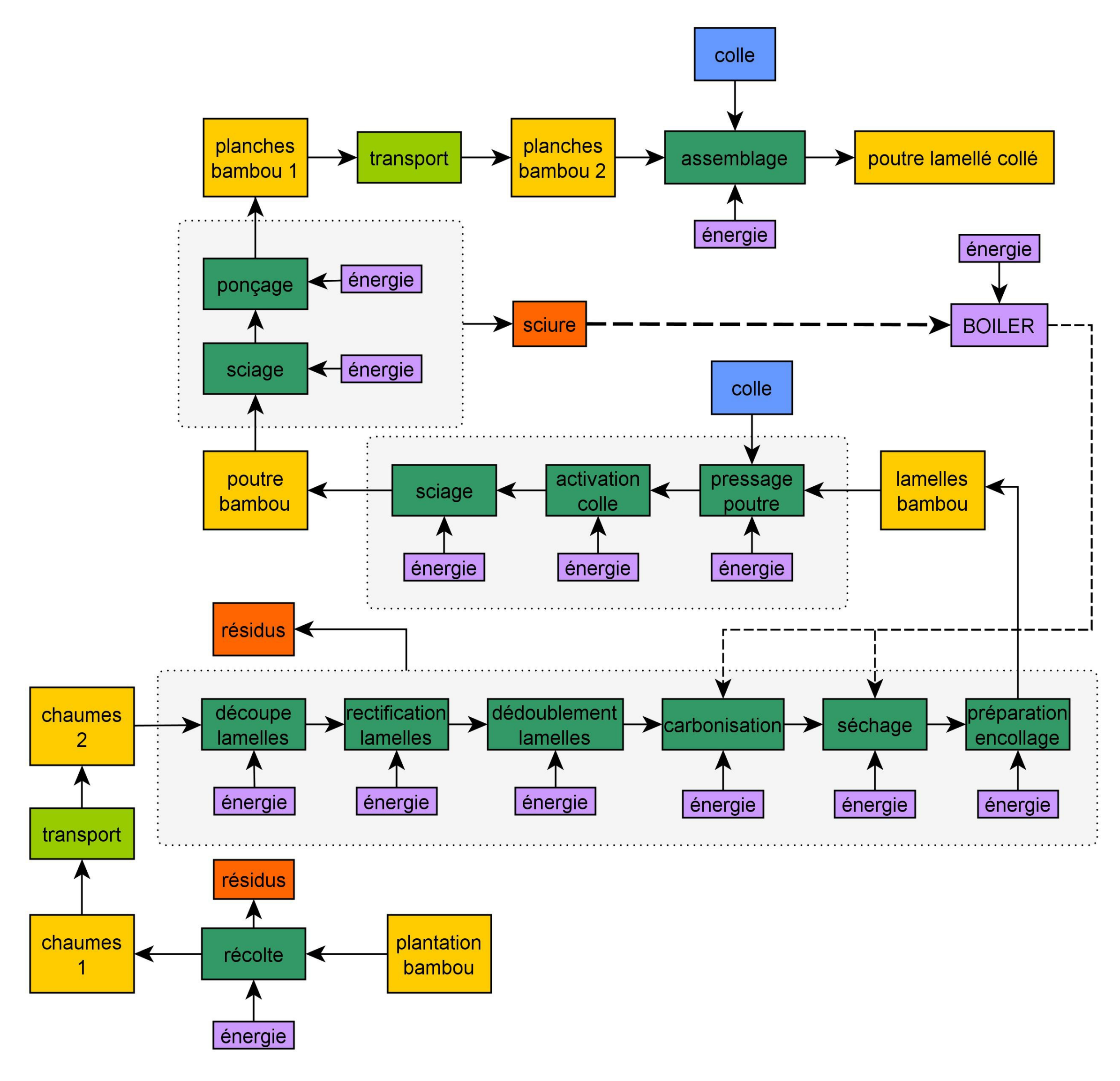


Illustration 41: Étapes fabrication poutre lamellé-collé en bambou transport et sous-produits

En accord avec l'hypothèse (2), la fabrication de la poutre en elle-même n'est pas considérée, de même que l'entretien et la fin de vie de cette dernière. Les frontières du systèmes se situent donc à l'arrivée des planches à l'usine de fabrication du lamellé-collé (Illustration 42).

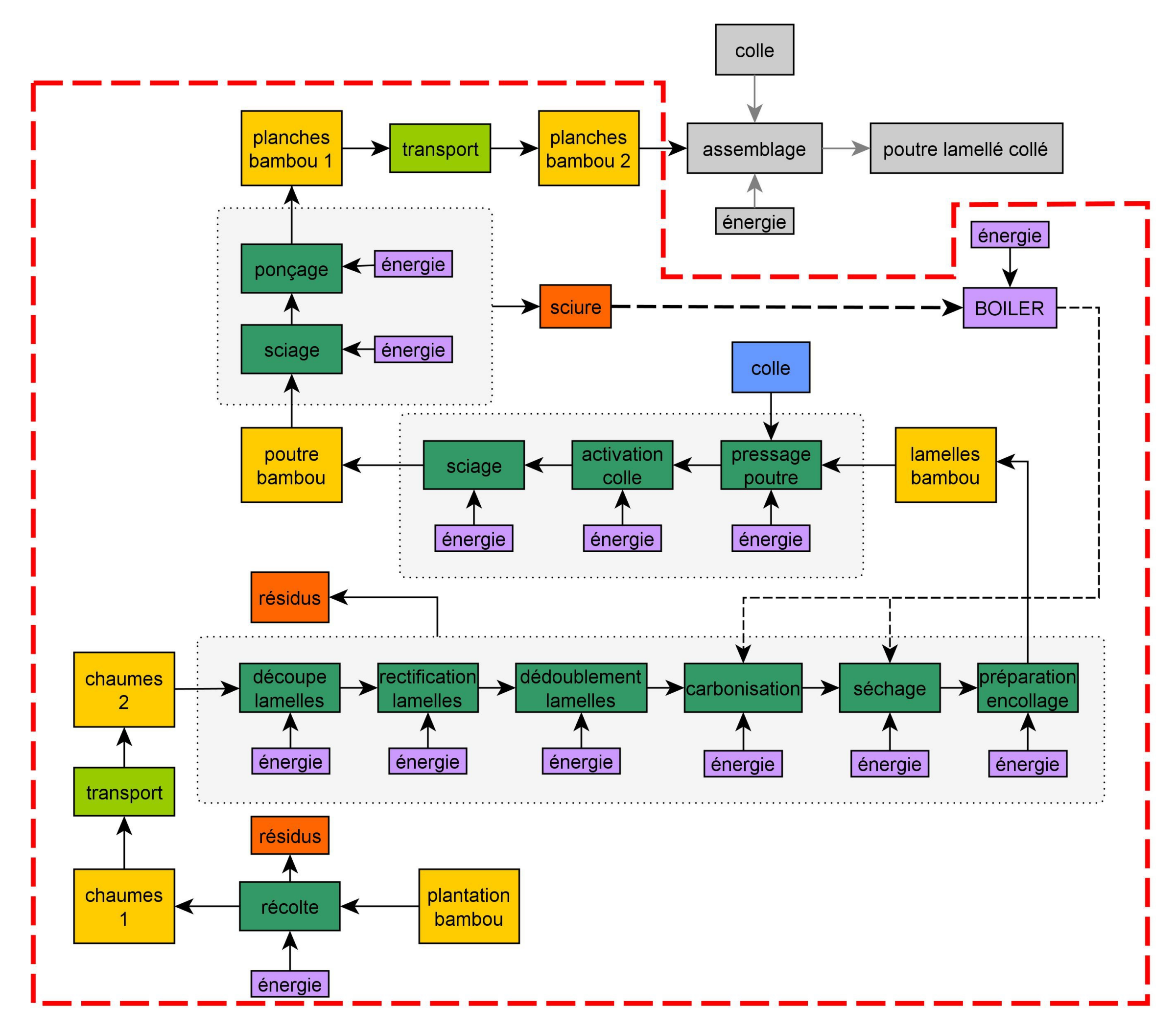


Illustration 42: Système à étudier et ses limites

3. Scénarios alternatifs

- ***Scénario 1***

Pour notre modélisation de la fabrication du SWB, nous avons considéré, pour les diverses consommations d'énergie, le mix énergétique chinois (« Electricity, medium voltage, at grid/CN »).

Dans le cas d'une importation des chaumes de bambou pour une fabrication européenne de SWB, nous modéliserons également dans ce scénario la consommation d'énergie avec le mix énergétique européen (« Electricity, medium voltage, production UCTE, at grid »). Ce mix est choisi pour correspondre à celui utilisé pour la bois.

- ***Scénario 2***

La modélisation de la poutre en bois utilise du bois brut. Cependant, dans le processus de fabrication des planches de SWB, il y a une étape de ponçage. Pour que la comparaison se base sur des produits plus similaires, ce scénario ajoute une étape de traitement de surface (« Sawn timber, softwood planed ») aux planches de bois utilisées pour la poutre en lamellé-collé de comparaison.

E. INVENTAIRE

1. Lamellé-collé bambou

Le point suivant reprend toutes les informations et hypothèses utilisées pour l'élaboration de chaque produit, processus par processus, lors de la modélisation. Pour faciliter la lisibilité des résultats présentés par la suite, nous indiquerons à chaque fois l'étape correspondant au schéma du système présenté précédemment ainsi que le nom donné à ce processus dans la modélisation (en anglais).

Les données utilisées sont à chaque fois reprises dans des schémas récapitulatifs basés sur les raisonnements suivis.

- ***Plantation bambou – Bamboo standing***

Nous considérons une plantation gérée de manière durable, avec une récolte de bambou de 750 chaumes de bambou par hectare par an. Comme la production de SWB ne demande pas une qualité particulière, nous considérons que le chaume est utilisé sur toute sa longueur pour la production de lamelles. Suivant l'étude de l'INBAR [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009], le volume de bambou d'un chaume mature est de 0,0136 m³. Ce qui, pour une densité de 700 kg/m³ correspond à 9,52 kg/chaume. Ce qui donne une occupation du sol de l'ordre de 0,00014 ha par kg de bambou (1,4 m²/kg).

Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce travail, la quantité de CO_2 fixée par le bambou est globalement similaire à celle fixée par le bois. Nous avons donc considéré la même valeur que pour le bois.

Au niveau du changement d'affectation du sol pour la mise en place de la plantation, n'ayant aucune donnée à ce sujet, nous avons opté pour une origine inconnue vers une forêt avec exploitation intensive.

Input :

CO_2 fixé	1,65 kg
Occupation annuelle du sol	0,00014 ha/kg
Transformation (état initial)	État inconnu
Transformation (état transformé)	Forêt à exploitation intensive

Output :

Bamboo standing	1 kg

- ***Chaumes 1 – Bamboo harvested***

Une étude sur la fixation du carbone [Isagi et al. : 1997] par le bambou nous permet de déterminer la quantité de résidus de coupe dont il faut tenir compte. Par hectare, l'article donne 116,5 t de chaumes et 21,4 t de branches et feuilles[33]. Les feuilles et branches représentent donc 15,5% de ce qui est récolté. Ce qui correspond à 0,18 kg de résidus de coupe par kg de chaume récolté.

Suivant l'INBAR [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009], les chaumes sont coupés à la tronçonneuse qui permet la récolte de 234 chaumes avec 3,785 l d'essence. En estimant que la tronçonneuse consomme 2 l/h [ALEL :

33 Le lecteur attentif se fera peut-être la remarque que cela correspondrait (en considérant 9,52 kg par chaume comme avancé au point précédent), cela correspondrait à une densité beaucoup plus importante que 3300 chaumes/ha. Cela est tout à fait possible car la densité de chaume varie selon que l'on soit en forêt cultivée ou non. Comme, durant l'étude, aucun chaume n'a été récolté, il est normal que la densité de chaumes soit plus grande. Nous faisons tout de même l'hypothèse que le rapport feuilles/chaume reste similaire.

s.d.] nous obtenons un temps de coupe de 6 s par kg de bambou. Pour la modélisation de la tronçonneuse, nous utilisons un module pré-existant dans Simapro : « Power sawing, without catalytic converter ». Nous l'avons cependant adapté, conformément à l'hypothèse (3), en supprimant l'impact dû à la tronçonneuse elle-même.

Récapitulatif :

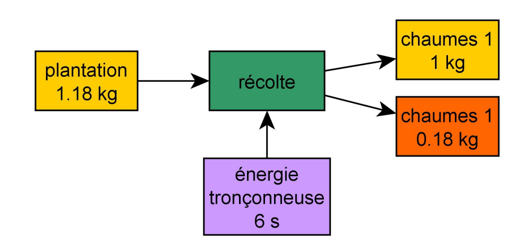


Illustration 43: ICV récolte

- ***Chaume 2 – Bamboo at plant***

Les chaumes coupés sont acheminés depuis la plantation dans le district administratif de Ānjí Xiàn vers l'usine de fabrication du SWB située à Hangzhou (Illustration 44).

Ce transport se déroule en deux étapes :

- Tout d'abord, un trajet de 15 km en camion de 5 tonnes (pour la modélisation nous avons considéré une valeur globale (Transport, lorry 3,5-7,5 t, EURO3). Ce qui donne pour le transport d'1 kg de bambou 0,001 t*15 = 0,015 tkm.

- Ensuite, un trajet de 300 km en camion de 8 tonnes (Transport, lorry 7,5-16 t, EURO3). Ce qui donne pour le transport d'1 kg de bambou 0,001*300 = 0,3 tkm.

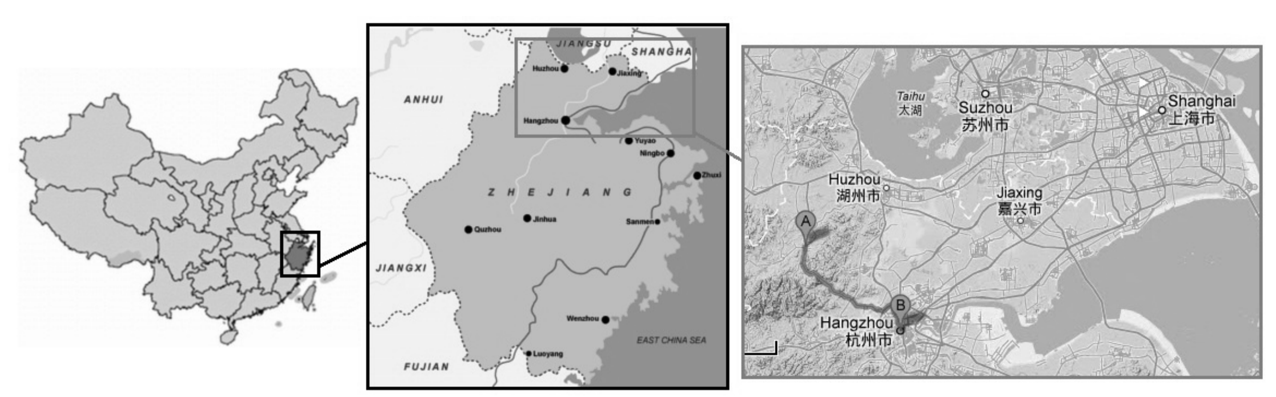


Illustration 44: Transport bambou plantation vers usine [Steimel : 2005] [China TouristMaps : s.d.] [Google maps : 2012]

Au sujet de la modélisation du transport, il semble intéressant de préciser que Simapro considère le trajet retour du camion vide dans son analyse des impacts [Spielmann et al. : 2007].

Récapitulatif :

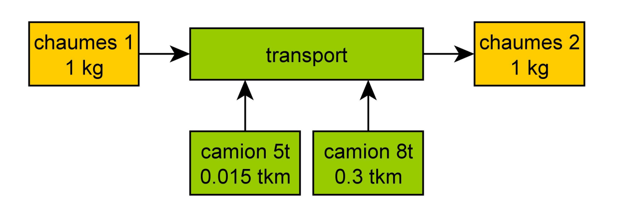


Illustration 45: ICV transport 1

- ***Lamelles bambou – Bamboo strip***

Comme cela a été expliqué lors de la description du procédé de fabrication du SWB, plusieurs étapes entrent dans l'élaboration des lamelles de bambou. A travers ces différentes étapes, nous avons considéré une perte de 35 % en masse[34], ce qui donne 0,54 kg de résidus de pour la production d'1 kg de lamelles. Sachant qu'une lamelle mesure en moyenne 2000 x 20 x 3 mm soit un volume de 0,00012 m³ et une masse de 0,084 kg (avec densité de 700 kg/m³).

Pour chaque processus, nous donnerons la puissance de la machine utilisée ainsi que le temps d'utilisation nécessaire par kg de lamelles. Ces valeurs sont issues du rapport de l'INBAR [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009].

Récapitulatif :

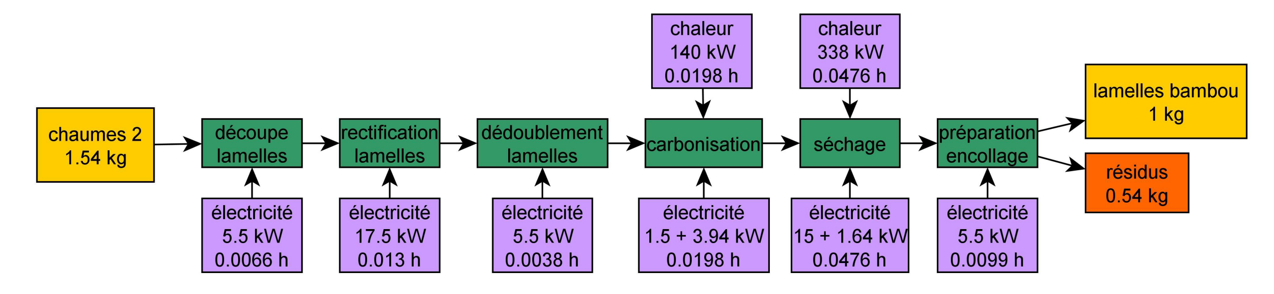


Illustration 46: ICV lamelles

- **Découpe lamelles – stripping**

La découpeuse utilisée a une puissance de 5,5 kW. Elle permet la découpe de 9000 lamelles en 8 h. Sur toutes ces lamelles, 22 sur 36 font 6 mm d'épaisseur et pourront être dédoublées, pour fournir un total de 58 lamelles par chaume. Ce qui donne 14 500 lamelles en 8 h, ou 1218 kg en 8 h, ou encore 152,25 kg/h. Il faut donc 0,0066 h (un peu moins de 24 secondes) pour obtenir 1 kg de lamelles.

- **Rectification lamelles – planing**

La machine de rectification de lamelles a une puissance comprise entre 15 et 20 kW, nous avons donc considéré la moyenne, soit 17,5 kW. Cette machine peut rectifier 4500 lamelles en 8 h. Suivant le même raisonnement qu'au point précédent, il s'agit de 7250 lamelles en 8 h, ou 609 kg en 8 h, ou encore 76,125 kg/h. Il faut donc 0,013 h (environ 47 s) pour produire 1 kg de lamelles.

- **Dédoublement lamelles – splitting**

La machine utilisée a une puissance semblable à celle de la découpeuse, soit 5,5 kW. Elle permet de dédoubler 1200 lamelles/h, ce qui donne 2400 lamelles/h, ou encore 201,6 kg/h. Il faut donc 0,005 h (un peu moins de 18 s) pour obtenir 1 kg de lamelles. Mais, nous l'avons vu, seules 44 lamelles sur les 58 doivent passer par ce traitement, soit environ 76%. Nous considérons donc 0,0038 h/kg.

34 Informations de C. Doutrelepont qui avait déjà entamé la récolte de données pour effectuer une ACV sur le SWB mais qui a du arrêter par manque de temps.

- **Carbonisation – carbonization**

La carbonisation se fait en deux étapes (suivie à chaque fois d'un séchage). La première étape permet de traiter 1000 lamelles par heure, ce qui correspond à 0,0119 h par kg de lamelles. La seconde étape permet de traiter 1500 lamelles par heure, ce qui correspond à 0,0079 h par kg de lamelles. Il faut donc au total 0,0198 h (un peu plus d'une minute) par kg de lamelles.

L'autoclave est alimenté par plusieurs sources : une chaudière de carbonisation et une chaudière centrale. La première a une puissance de 1,5 kW. Pour la seconde, la détermination est un peu plus complexe et est détaillée dans l'encadré ci-dessous.

L'usine de fabrication du SWB possède une grande chaudière. Nous possédons deux informations à son sujet :

- Sa puissance : 22 kW.
- Les résidus issus de la chaîne de fabrication y sont brûlés (400 kg par heure) afin de fournir de la chaleur.

Plusieurs machines dépendent de la chaudière : la chambre de séchage des lamelles, l'autoclave pour la carbonisation, l'alimentation de bains de trempage et les presses à chaud. Seules les deux premières sont utilisées pour la fabrication du SWB. Le rapport de l'INBAR [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009] définit la répartition des 12 kW comme étant : 7,4% (soit 1,64 kW) pour la chambre de séchage et 17,9% (soit 3,94 kW) pour l'autoclave.

L'INBAR ne prenant pas en compte la combustion des 400 kg de résidus dans son étude, aucune information complémentaire n'est disponible. Nous avons considéré comme important d'inclure la combustion car, même si au niveau des émissions de carbone le bilan peut être pris comme nul, il y aura quand même émission de particules et autres composés.

La quantité de biomasse brûlée correspond (en considérant 17 MJ/kg) à 6800 MJ, ou encore 1,88 MWh. En gardant le même pourcentage d'allocation pour les différents processus alimentés que pour l'énergie, cela correspond à 140 kWh pour la chambre de séchage et 338 kWh pour l'autoclave.

L'autoclave est donc alimentée par la chaudière pour une puissance de 3,94 kW et une consommation de chaleur de 140 kWh.

- **Séchage – drying**

Il y a deux phases de séchage : la première dure 168 h et la seconde 72 h. Ce qui donne un total de 240 h. La chambre de séchage a une capacité de 60 000 lamelles, ce qui correspond à un temps de séchage de 0,0476 h (un peu moins de 3 minutes) par kg de lamelles.

Comme l'autoclave, la chambre de séchage est alimentée à la fois par la chambre elle même, pour une puissance de 15 kW, et par la chaudière (voir encadré ci-dessus) pour une puissance de 1,64 kW et une consommation de chaleur de 338 kWh.

- **Préparation encollage - crushing**

La machine utilisée a une puissance de 5,5 kW et permet de traiter 1200 lamelles par heure ou 100,8 kg/h. Il faut donc 0,0099 h (un peu moins de 36 s) par kg de lamelles.

- ***Poutre bambou – Bamboo beam SWB***

Ayant opté pour une poutre lamellé-collé d'intérieur, le SWS sera composé à 15,1% en masse de colle (Urea formaldehyde resin, at plan). Pour 1 kg de SWB, il faudra donc, en considérant que la colle a plus ou moins la même masse volumique que les lamelles comprimées (1100 kg/m³), 0,151 kg de colle pour 0,849 kg de lamelles.

Dans le rapport sur lequel cette analyse se base [Brezet, van der Lugt et Vogtländer : 2009], une poutre de SWB possède les dimensions suivantes : 1900 x 110 x 140 mm, soit 0,029 m³ ou, pour une densité de 1100 kg/m³, une masse d'environs 32,5 kg.

Comme pour les lamelles, la fabrication du SWB nécessite plusieurs étapes. De nouveau, nous donnerons la puissance de la machine employée ainsi que le temps d'utilisation par kg de SWB.

Récapitulatif :

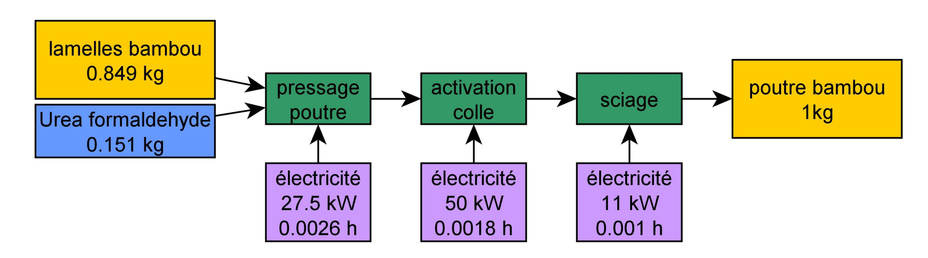


Illustration 47: ICV poutre SWB

- **Pressage poutre – pressing**

Les lamelles encollées sont comprimées à haute pression par une presse chaude dont la puissance est estimée à 27,5 kW durant 5 minutes. Ce qui correspond à un pressage de 0,0026 h (un peu plus de 9 s) par kg de SWB.

- **Activation colle – glue activating**

Les poutres de SWB sont placées durant 8 h dans un four d'une puissance de 50 kW et d'une capacité de 8 m³. Les poutres se trouvant encore dans leur moule, elles prennent plus de place (2000 x 200 x 150 = 0,06 m³) : 133 poutres peuvent y être placées simultanément. Il faut donc 0,0018 h (un peu moins de 7 s) par kg de SWB.

- **Sciage – sawing**

Les poutres sorties des moules sont ajustées par sciage des bords. Pour l'analyse, nous prenons l'hypothèse que les sciures sont négligeables et nous ne considérons donc pas de déchets pour cette étape. La scie a une puissance de 11 kW.

Par poutre, le sciage dure 2 minutes, soit 0,001 h (un peu moins de 4 s) par kg de SWB.

- ***Planches bambou 1 – Bamboo plank SWB***

A partir d'une poutre de SWB, 8 planches sont découpées. Chaque planche a les dimensions suivantes : 1900 x 100 x 15 mm, ce qui correspond à 0,00285 m³ ou encore 3,135 kg. Si une poutre pèse 32,5 kg, 8 planches pèsent 25,1 kg : ce qui fait une perte de 22,8% en masse. Il faut donc 1,295 kg de poutre de SWB pour obtenir 1 kg de planche de SWB (et 0,295 kg de sciures).

Récapitulatif :

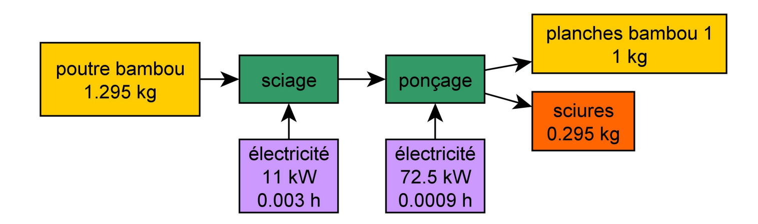


Illustration 48: ICV planche SWB

➢ **Sciage – sawing**

La scie utilisée est identique à celle du processus précédent, elle a donc une puissance de 11 kW.

Le temps de sciage est différent : 120 planches sont sciées par heure. Ce qui correspond à 376,2 kg/h : il faut donc 0,027 h (un peu moins de 10 s) pour obtenir 1 kg de planches SBW.

➢ **Ponçage – sanding**

La ponceuse a une puissance comprise entre 55 et 90 kW. Comme pour la rectification des lamelles, nous considérerons la valeur moyenne, c'est-à-dire 72,5 kW.

Elle permet de traiter 150 m²/h. Une planche ayant une surface extérieure de 0,44 m², il faudra donc compter 0,0029 h par planche, soit 0,0009 h (un peu plus de 3 s) par kg de planche SWB.

- ***Planches bambou 2 – Bamboo plank SWB BE***

Les planches, placées dans des containers de 30 tonnes, sont acheminées vers l'usine de fabrication de poutres lamellé-collé en Belgique. Ce transport se déroule en 3 étapes :

➢ Premièrement, le transport depuis l'usine vers le port de Shanghai (Illustration 49), par un camion de 28 tonnes (Transport, lorry 16-32 t, EURO3) sur lequel est directement placé le container. La distance à parcourir est de 300 km, ce qui donne, pour 1 kg de planches, 0,001 t*300 = 0,3 tkm.



Illustration 49: Transport entre l'usine et le port de Shanghai [Google maps : 2012]

➢ Deuxièmement, le transport entre les ports de Shanghai et de Rotterdam par navire de fret trans-océanique (Transport, transoceanic freight ship). La distance est de 19 208 km, ce qui donne, pour 1 kg de

planches, 0,001*19208 = 19,208 tkm.

- Et troisièmement, le transport depuis Rotterdam jusqu'à l'usine de fabrication de poutres lamellé-collé. Nous avons choisi de prendre comme entreprise repère Ecolam qui se situe à Ciney. La distance de transport est donc de 300 km, ce qui correspond, pour 1 kg de planches, à 0,3 tkm. Le transport se fait par camion de 28 tonnes (Transport, lorry 16-32 t, EURO3).

Récapitulatif :

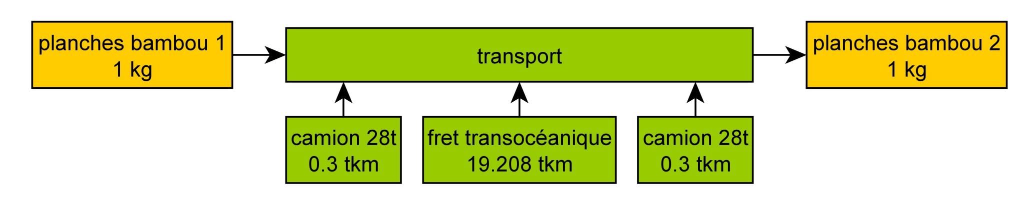


Illustration 50: ICV transport 2

Un tableau récapitulatif des différentes données se trouve en Annexe B.

2. Lamellé-collé bois

- ***Choix du bois de comparaison***

Le choix du bois de comparaison s'est fait sur plusieurs critères :

- Un bois de type épicéa, donc du « softwood ».
- Un taux d'humidité d'environs 12%.
- Un séchage industriel en four (pour similarité avec le processus de fabrication du bambou).

Nous avons donc opté pour le module Ecoinvent « Sawn timber, softwood, raw, kiln dried, u=10%, at plant ».

- ***Adaptation***

Plusieurs adaptations ont du être apportées au module sélectionné.

Tout d'abord, le bois utilisé pour les poutres de comparaison est importé des pays scandinaves. Or aucun module de bois scié ne correspond à cette provenance. Il a donc fallu modifier celui présenté au point précédent en substituant un sous module « softwood » général par un sous module « scandinavian softwood » correspondant.

Ensuite, nous avons ajouté une phase de transport en 3 étapes :

- Le transport entre l'exploitation forestière et le port d'exportation pour lequel nous avons considéré les mêmes paramètres que pour le transport du bambou vert le port, soit 300 km et un camion de 28 t
- Le transport par navire de fret trans-océanique entre le port d'exportation (que nous avons

considéré en Mer Baltique [Piel et al. : 2007]) et le port de Rotterdam, que nous avons approximé à 1 300 km.

- Le transport entre le port de Rotterdam et Ecolam, identique à celui du SWB.

Enfin, conformément à l'hypothèse (4), nous avons supprimé la prise en compte des machines utilisées dans le module.

F. Évaluation des impacts : IMPACT 2002+

1. Vision globale

La méthode d'analyse d'impacts utilisée est IMPACT 2002+. Cette dernière est développée par l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et permet l'évaluation au niveau intermédiaire (catégories d'impacts) et au niveau des dommages (catégories de dommages).

Le schéma général de la méthode est présenté sur l'Illustration 51. Les flèches représentent les voies d'impacts (en pointillé si incertaines) [Humbert et al. : 2007] [Jolliet et al. : 2005].

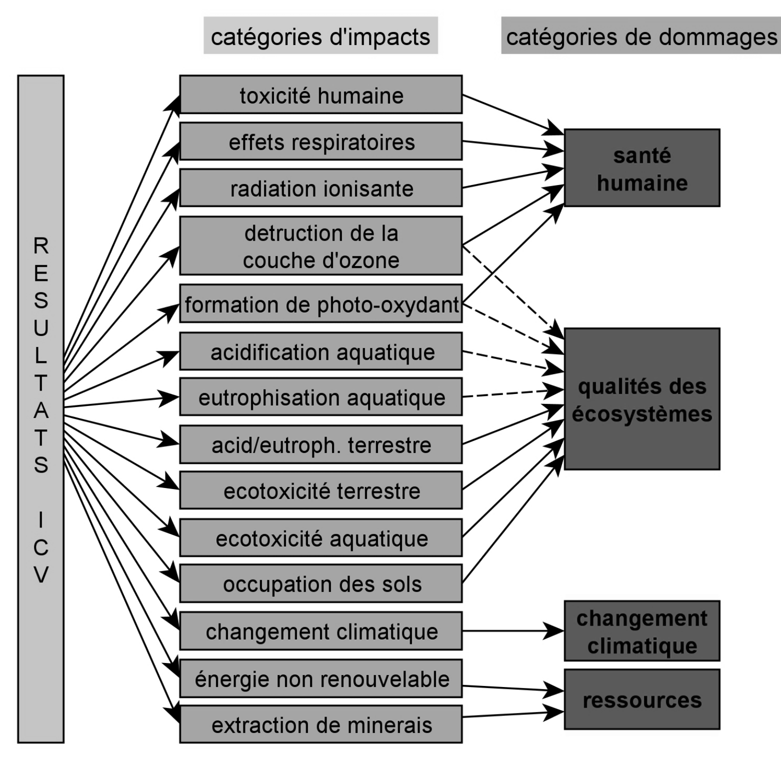


Illustration 51: Schéma général de la méthode IMPACT 2002+ [Humbert et al. : 2007]

2. Catégories d'impacts

Les catégories d'impacts sont au nombre de 14. Pour chacune d'entre elles, les impacts sont exprimés dans une unité équivalente correspondant à une substance de référence (Tableau 6). La catégorie toxicité humaine est subdivisée en deux sous catégories : cancérigène et non-cancérigène.

Tableau 6: Catégories d'impacts et substances de référence utilisées dans IMPACT 2002+ [Jolliet et al. : 2005]

Catégorie d'impacts	*Nom anglais*	Substance de référence
Toxicité humaine[35]	*Human Toxicity*	kg chlorure de vinyle éq. dans l'air
Effets respiratoires[36]	*Respiratory inorganics*	kg $PM_{2,5}$ éq. dans l'air
Radiation ionisante[37]	*Ioninzing radiation*	Bq carbone-14 éq. dans l'air
Destruction de la couche d'ozone[38]	*Ozone layer depletion*	kg CFC-11 éq. dans l'air
Formation de photo-oxydants[39]	*Respiratory organics*	kg éthylène éq. dans l'air
Acidification aquatique[40]	*Aquatic acidification*	kg SO_2 éq. dans l'air
Eutrophisation aquatique[41]	*Aquatic eutrophication*	kg PO_4^{3-}éq. dans l'eau

35 « Effets toxiques cancérigènes et non cancérigènes de substances sur l'être humain. » [Jolliet et al. : 2005]
36 « Maladies respiratoires (asthme, ...) dues à des substances inorganiques (particules, SO_2, NO_X, ...). » [Jolliet et al. : 2005]
37 « Radiation de très haute énergie capable de produire une ionisation des substances à travers lesquelles. Leur origine est la radioactivité de certaines substances qui contiennent des noyaux instables qui se désintègrent et émettent des radiations. » [Jolliet et al. : 2005]
38 « Phénomène de destruction de la couche d'ozone stratosphérique dû à certaines molécules comme les CFC. Cette couche est fondamentale pour la vie terrestre car elle absorbe les rayons UV nocifs. » [Jolliet et al. : 2005]
39 « Concerne la formation d'ozone dans la troposphère (partie inférieure de l'atmosphère) à partir de composés organiques volatiles et de NO_X. L'ozone ainsi formé est un fort oxydant, provoquant des problèmes respiratoires et limitant la croissance végétale. » [Jolliet et al. : 2005]
40 « Phénomène correspondant à une augmentation de la concentration des protons (ions H+ provenant essentiellement de l'acide nitrique HNO_3 ou l'acide sulfurique H_2SO_4 dans les eaux, entraînant une baisse du pH. L'acidification des eaux entraîne aussi une dissolution de certains métaux toxiques comme l'aluminium. » [Jolliet et al. : 2005]
41 « Enrichissement excessif d'un milieu aquatique en éléments nutritifs (azote, phosphore) ou en matières organiques, provoquant un développement surabondant de biomasse végétale dont la décomposition ultérieure consomme l'oxygène dissout dans l'eau et réduit la biodiversité du milieu aquatique. » [Jolliet et al. : 2005]

Acidification[42]/eutrophisation[43] terrestre	*Terrestrial acidification/nutrification*	kg SO_2 éq. dans l'air
Ecotoxicité terrestre[44]	*Terrestrial ecotoxicity*	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau
Ecotoxicité aquatique[45]	*Aquatic ecotoxicity*	kg triéthylène glycol éq. dans l'eau
Occupation du sol	*Land occupation*	m² éq terre arable
Changement climatique [46]	*Global warming*	kg CO_2 éq. dans l'air
Énergie non renouvelable[47]	*Non-renewable energy*	MJ d'énergie non renouvelable ou kg pétrole brut éq
Extraction de minerais	*Mineral extraction*	MJ d'énergie supplémentaire ou kg minerais Fe éq

Les impacts pour les catégories « toxicité humaine », « écotoxicité terrestre » et « écotoxicité aquatique » sont modélisés à partir de la méthodologie IMPACT 2002. Les autres catégories utilisent d'autres méthodes comme Eco-indicator 99, CML 2001, ... [Humbert et al. : 2007] [Jolliet et al. : 2005]

3. Catégories de dommages

Lors du regroupement dans les catégories de dommages, les valeurs de caractérisation intermédiaire des catégories d'impacts dépendant d'une même catégorie de dommages sont multipliées par le facteur de caractérisation de dommage puis sommées. Les différents facteurs de dommages sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7: Facteurs de caractérisation et unités de dommages utilisés dans IMPACT 2002+ [Jolliet et al. : 2005]

Catégorie d'impacts	Facteur de dommage	Unité de dommage	Catégorie de dommages
Toxicité humaine	2,80E-006	[DALY]	Santé humaine
Effets respiratoires	7,00E-004		
Radiation ionisante	2,10E-010		
Destruction de la couche d'ozone	1,05E-003		
Formation de photo-oxydants	2,13E-006		
Acidification aquatique	En développement	[PDF.m².an]	Qualité des écosystèmes
Eutrophisation aquatique	En développement		
Acidification/eutrophisation terrestre	1,04		
Ecotoxicité terrestre	7,91E-003		
Ecotoxicité aquatique	5,02E-005		
Occupation du sol	1,09		
Changement climatique	1	[kg CO_2]	Changement climatique
Énergie non renouvelable	5,10E-002	[MJ]	Ressources
Extraction de minerais	4,65E+001		

Les valeurs présentées dans ce tableau sont pour la version 2.2 d'IMPACT 2002+. La version utilisée par Simapro7 étant la version 2.10, il est donc possible qu'il y ait de légères différences.

42 « Phénomène naturel amplifié par l'augmentation de certains polluants atmosphériques (essentiellement SO_2 et NO_X) qui se traduit par une perte d'éléments minéraux nutritifs pour les arbres et la végétation. » [Jolliet et al. : 2005]
43 « Enrichissement excessif d'un milieu terrestre en éléments nutritifs (azote, phosphore). » [Jolliet et al. : 2005]
44 « Toxicité vis-à-vis des organismes terrestres vivants, l'homme étant exclu. » [Jolliet et al. : 2005]
45 « Toxicité vis-à-vis des organismes aquatiques vivants, l'homme étant exclu. » [Jolliet et al. : 2005]
46 « Modification des équilibres climatiques, et notamment du phénomène naturel d'effet de serre, due à l'augmentation d'origine anthropique de certains gaz dits « à effet de serre » dans l'atmosphère. » [Jolliet et al. : 2005]
47 « Énergie n'étant pas ou remplacée très lentement par des processus naturels. » [Jolliet et al. : 2005]

Il y a donc 4 catégories de dommages :

1. La santé humaine qui exprime les différents impacts en années de vie perdues (DALY – Disability Adjusted Life Years).
2. La qualité des écosystèmes rapporte les impacts en fraction d'espèces disparues sur une surface d'1m² durant 1 an (PDF.m².an - Potentially Disappeared Fraction of species over 1 m² during 1 year).
3. Le changement climatique ne dépendant que d'une seule catégorie d'impact, la valeur est directement reprise (facteur 1).
4. Les ressources expriment les impacts en mégajoules (MJ) d'énergie primaire non renouvelable dissipée et, pour les minerais, sur l'énergie additionelle qui sera consommée dans le futur pour compenser la diminution de la teneur en minerais des mines.

[Humbert et al. : 2007] [Jolliet et al. : 2005]

4. Caractérisation

- ***Normalisation***

IMPACT 2002+ propose une normalisation qui se fait en divisant la valeur d'impact par unité d'émission, correspondant à une catégorie de dommages, par l'impact total par européen par an pour cette catégorie. Le score normalisé est exprimé en points. Les facteurs de normalisation sont présentés dans le Tableau 8 [Humbert et al. : 2007].

Tableau 8: Facteurs de normalisation pour les quatre catégories de dommages pour l'Europe occidentale [Humbert et al. : 2007]

Catégorie de dommages	Facteur de normalisation	Unité
Santé humaine	0,0071	DALY/point
Qualité des écosystèmes	13 700	PDF.m².an/point
Changement climatique	9 950	kg CO_2/point
Ressources	152 000	MJ/point

Les scores normalisés doivent être considérés par catégorie de dommages. Ils ne peuvent être sommés en vue d'obtenir une seul score sans qu'il y ait eu pondération (weighting, en anglais).

- ***Pondération***

Pour l'analyse des résultats, les auteurs d'IMPACT 2002+ suggèrent de se baser sur les scores obtenus séparément par les 4 catégories de dommages (santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources) et ne fournissent pas de facteurs de pondération.

Simapro propose toutefois une étape de pondération où chaque catégorie de dommages reçoit un facteur de pondération de 1 [Goedkoop et al. : 2008].

G. Interprétation des résultats

Nous présentons ici les résultats obtenus pour l'ACV comparative entre deux poutres lamellé-collé de bambou et de bois. Avant toute chose, il convient de préciser que nous nous intéressons plus à l'allure générale des impacts qu'à des valeurs précises. Le but étant de mettre en évidence les principales sources d'impacts ainsi que les majeures différences existant entre l'utilisation du SWB ou bois pour la fabrication de poutres en lamellé-collé.

Les résultats seront d'abord présentés par catégories d'impacts regroupées en fonction de leur catégorie de dommages. Ensuite, nous présenterons les résultats pour les catégories de dommages. Nous terminerons par les impacts en fonction des différents processus.

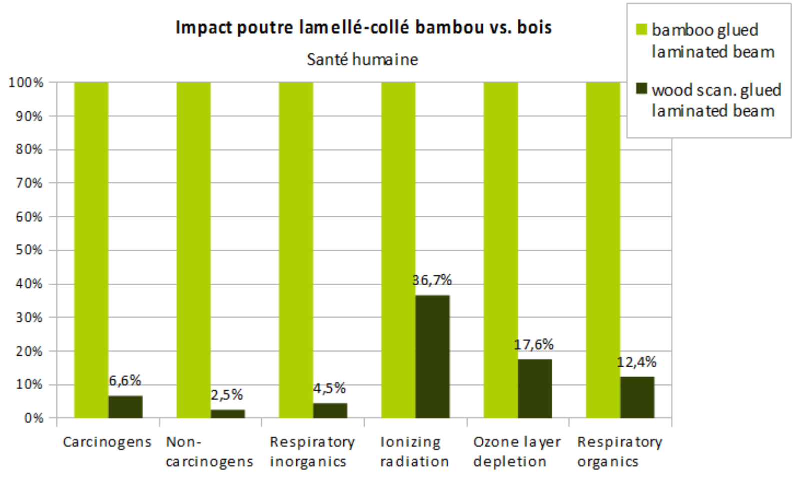
Pour plus de lisibilité dans les résultats, les valeurs des différentes catégories d'impacts sont données en pourcentage par rapport aux valeurs de la poutre de bambou qui est prise comme référence, c'est à dire 100%. Il est donc inadéquat de vouloir comparer les catégories d'impacts sur base de ces graphes. Cela sera plutôt fait sur base de la répartition des catégories ainsi que sur les valeurs d'impacts cumulés.

Des tableaux donnant les résultats plus détaillés pour les catégories d'impacts et de dommages ainsi que pour la normalisation se trouvent en Annexe C.

1. Résultats par catégorie d'impacts

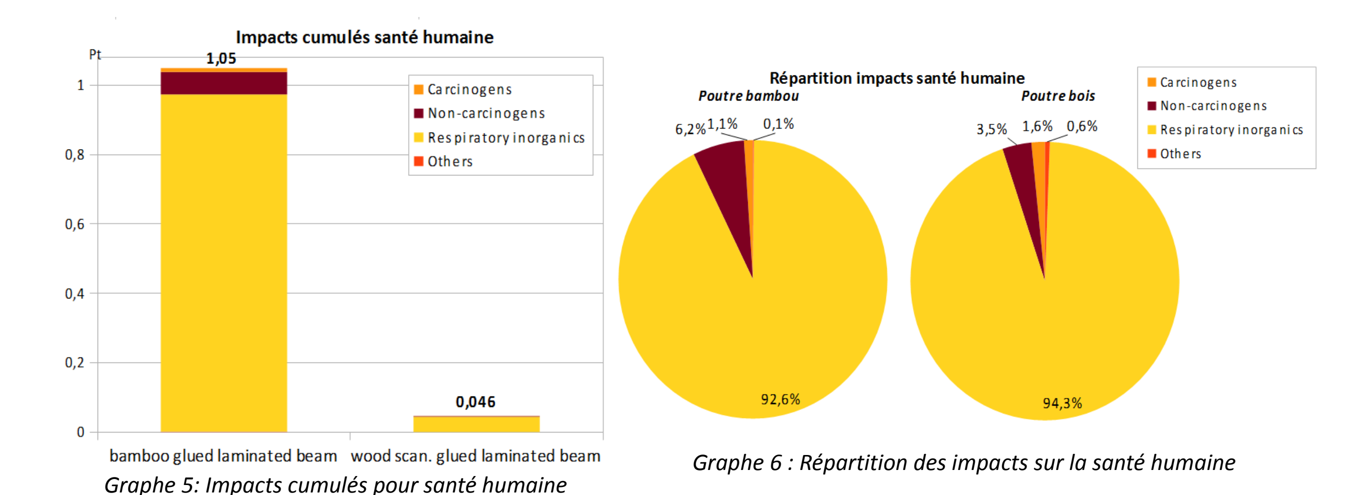
- ***Santé humaine***

Pour les dommages impactant sur la santé humaine, nous pouvons observer (Graphe 4) une différence relative importante entre les valeurs obtenues pour le bambou et pour le bois, et ce pour toutes les catégories d'impacts. Les diminutions les plus importantes se situent au niveau de la toxicité humaine (cancérigène et non-cancérigène) et des effets respiratoires.



Graphe 4 : Catégories d'impacts pour santé humaine

L'écart le moins important, mais toutefois de plus de 50 %, est obtenu pour les radiations ionisantes. Cependant, d'un point de vue quantitatif (Graphe 5), cette catégorie a très peu d'impact et la différence n'est pas perceptible. Ceci est un bon exemple pour venir appuyer la mise en garde faite au début de cette page. En effet, si le Graphe 4 pourrait donner une fausse impression de plus faible impacts pour les 3 premières catégories, mais comme le montrent les Graphes 5 et 6, ce n'est absolument pas le cas.



Graphe 5: Impacts cumulés pour santé humaine

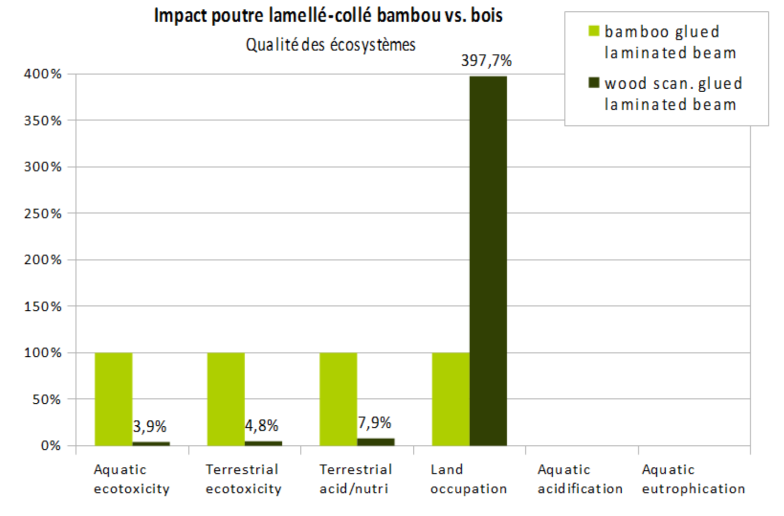
Graphe 6 : Répartition des impacts sur la santé humaine

Au niveau de l'importance relative des catégories (Graphe 6), ce sont d'ailleurs les effets respiratoires qui dominent. La toxicité humaine, en deuxième position, est déjà bien en deçà avec une participation de moins de 10 %. Les autres catégories ont une contribution inférieure à 1%, elles sont donc regroupées pour plus de lisibilité.

Les impacts cumulés montrent une différence d'un facteur 20 en faveur du bois.

- ***Qualité des écosystèmes***

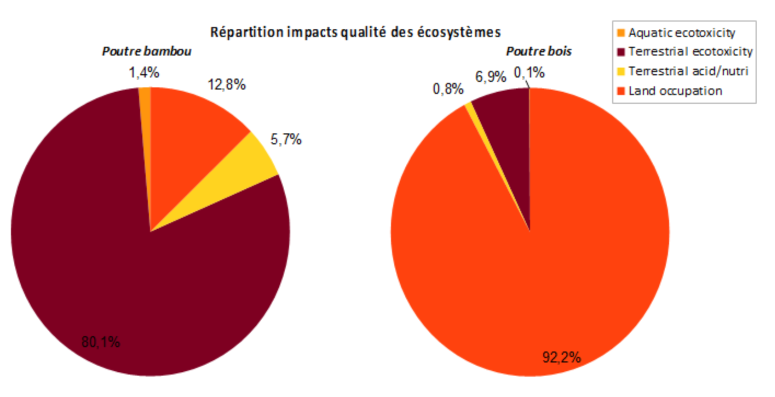
Pour la qualité des écosystèmes, nous pouvons également observer (Graphe 7) des impacts beaucoup moins importants pour les 3 premières catégories. Cependant, les impacts engendrés par l'occupation du sol sont presque 4 fois plus importants pour le bois que pour le bambou.



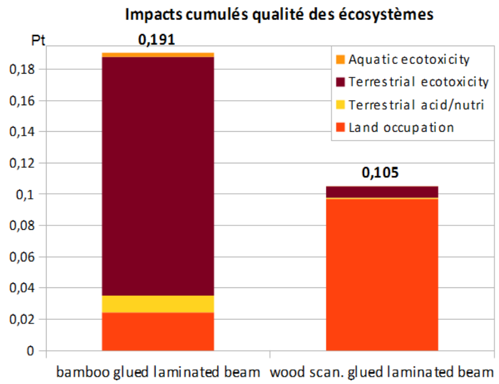
Graphe 7 : Catégories d'impacts pour qualité des écosystèmes

Comme nous l'avons vu précédemment, les deux dernières catégories ne possèdent pas encore de facteur de dommage et n'entrent pas dans l'évaluation.

Si pour la catégorie de dommages sur la santé humaine, il y avait une diminution de tous les impacts, ce n'est pas le cas ici. Ce qui engendre une redistribution dans la répartition des impacts (Graphe 8).



Graphe 8 : Répartition des impacts sur la qualité des écosystèmes



Graphe 9 : Impacts cumulés pour santé humaine

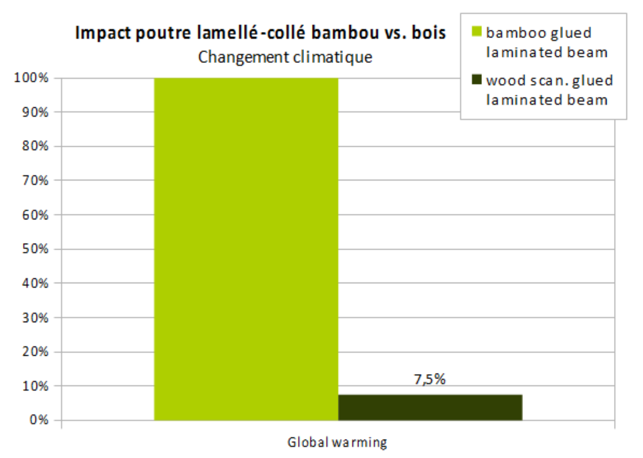
Pour le bambou, c'est l'écotoxicité terrestre qui domine, suivie par l'occupation du sol et l'acidification/eutrophisation terrestre. Pour le bois, il y a inversion : c'est l'occupation du sol qui domine devant l'écotoxicité terrestre. L'acidification/eutrophisation terrestre est moins présente.

Les impacts cumulés (Graphe 9) montrent une différence moins importante que pour la santé humaine, mais toujours en faveur du bois d'un facteur pratiquement égal à 2.

- ***Changement climatique***

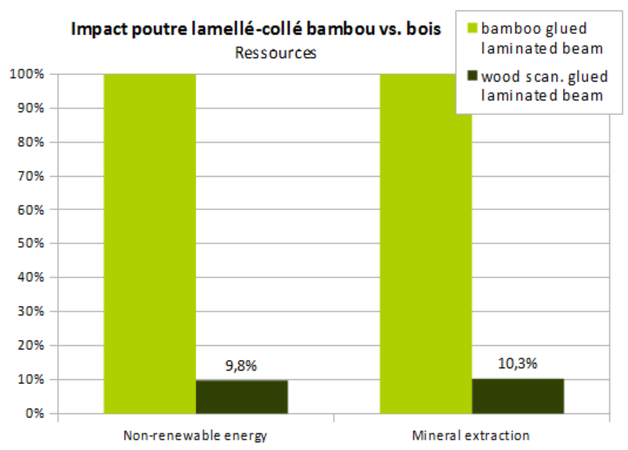
Pour le changement climatique, il y a encore une fois une réduction importante des impacts pour l'utilisation du bois (Graphe 10).

Cette catégorie de dommages ne dépendant que d'une catégorie d'impacts, le réchauffement climatique, aucun diagramme de répartition n'est nécessaire et nous pouvons directement en déduire qu'il existe un facteur d'un peu plus de 10 entre le bambou et le bois, toujours en faveur du bois.



Graphe 10 : Catégories d'impacts pour changement climatique

- ***Ressources***



Graphe 11 : Catégories d'impacts pour ressources

Pour la catégorie de dommages sur les ressources, nous pouvons à nouveau observer une diminution assez importante des impacts (Graphe 11).

La catégorie d'impacts énergie non-renouvelable est prépondérante : elle est à l'origine de plus de 99% des impacts dans les deux situations. Pour cette raison, le diagramme des répartitions n'apporte pas vraiment d'informations supplémentaires et n'est pas présenté pour cette catégorie.

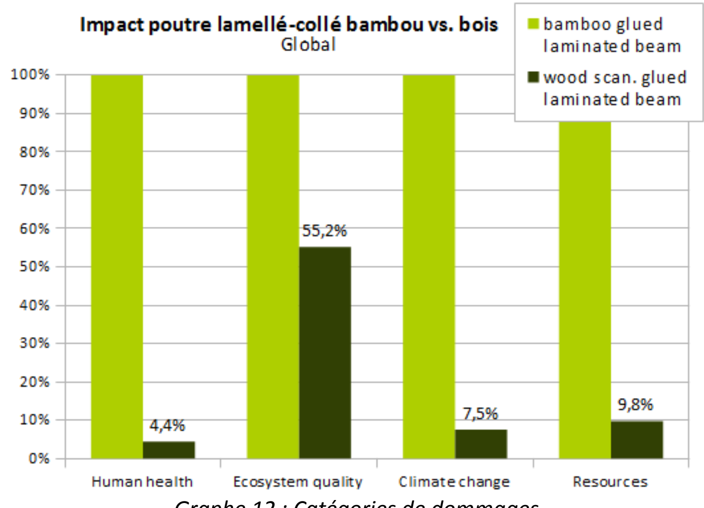
Comme pour le changement climatique, nous pouvons donc déduire directement qu'il existe un facteur 10 en faveur du bois.

2. Résultats par catégorie de dommages

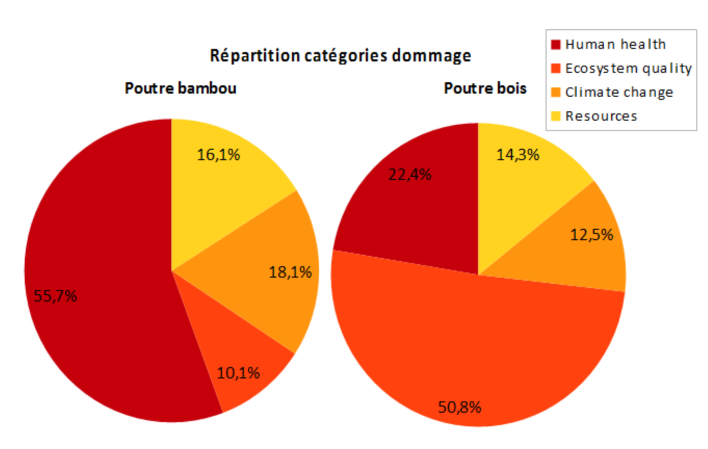
Nous allons maintenant regarder les catégories de dommages dans leur globalité.

Sur le graphe suivant (Graphe 12), nous retrouvons les différents facteurs obtenus au point précédent :

- Une diminution d'un facteur 20 pour les dommages sur la santé humaine.
- Une diminution de moitié (facteur 2) des dommages sur la qualité des écosystèmes.
- Une diminution d'un facteur 10 pour les dommages dus au réchauffement climatique et aux ressources.



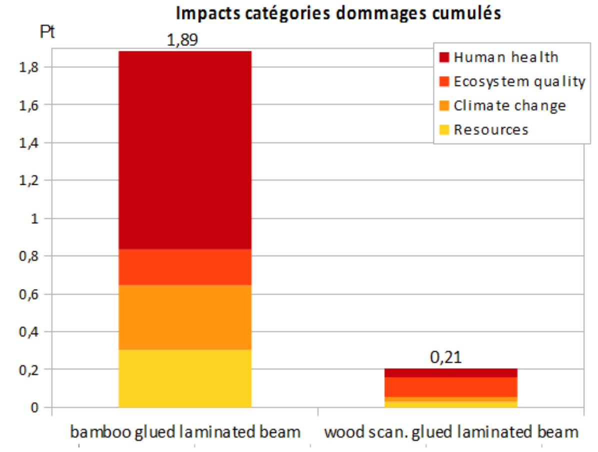
Graphe 12 : Catégories de dommages



Graphe 13 : Répartition des catégories de dommages

Pour ce qui est de la répartition des dommages (Graphe 13), pour le bambou, ils proviennent majoritairement de la catégorie santé humaine, puis des catégories ressources et changement climatique. La qualité des écosystèmes arrive en dernier lieu pour une contribution de seulement 10%. Alors que, pour le bois, elle occupe la première place avec 50%, suivie par la santé humaine et enfin par les ressources et le changement climatique.

De manière globale (Graphe 14), bien qu'ils soient d'origines et de proportions différentes, les dommages cumulés sont beaucoup plus importants (pratiquement un facteur 10) pour la poutre lamellé-collé en bambou que pour celle en bois.



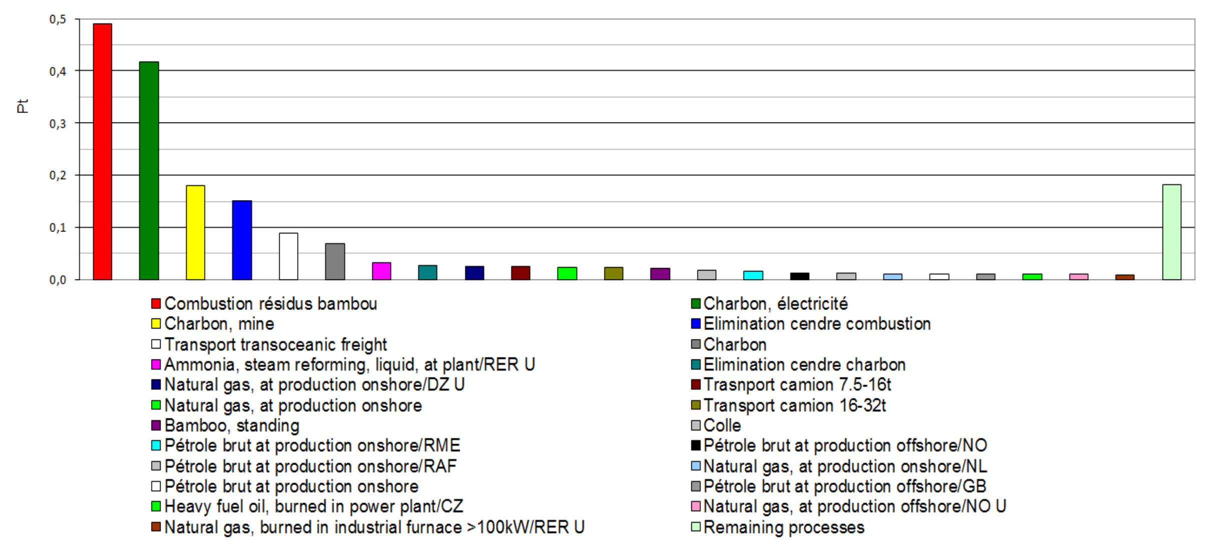
Graphe 14 : Impacts cumulés des catégories de dommages

Ce constat est relativement intéressant puisque le bambou est souvent présenté comme environnementalement intéressant. Si le seul impact considéré est l'occupation du sol, grâce à sa croissance spectaculaire, le bambou est en effet meilleur. Mais si toutes les catégories d'impacts sont considérées, cet aspect positif n'est pas suffisant pour contrebalancer les autres aspects qui sont eux plus négatifs.

3. Vue générale du système

Maintenant que nous avons pu montrer les différents dommages engendrés par l'utilisation du bambou, il semble intéressant de déterminer quelles sont les origines de ces impacts.

Pour ce faire, nous allons observer les contributions des différents processus et sous-processus. Pour une bonne lisibilité, le graphe ci-dessous (Graphe 15) ne donne que les processus ayant les contributions les plus importantes (égales ou supérieures à 0,5%). Les autres sont reprises sous « Remaining processes ».

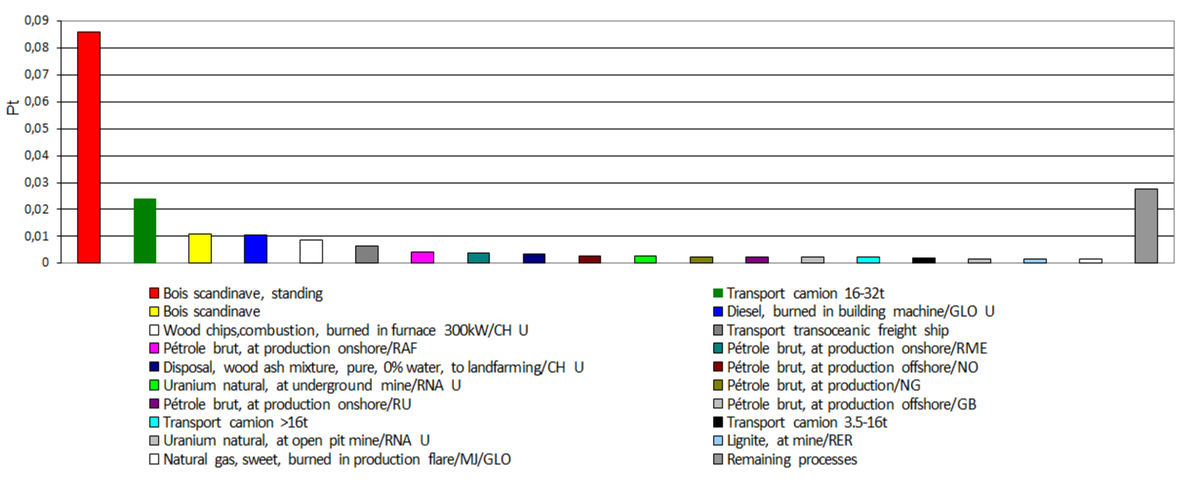


Graphe 15 : Contribution différents processus pour poutre bambou

De cette analyse ressort que, pour le bambou, les impacts proviennent majoritairement :

- De la combustion des résidus de bambou pour les phases de séchage et de carbonisation des lamelles de bambou.
- De l'utilisation de l'électricité dans les différentes étapes de fabrication du SWB.
- Du transport.

Pour le bois (Graphe 16), les origines sont plus réparties. Si presque la moitié des impacts sont dus au bois lui-même en tant que matière première, mis à part le transport, il n'y a pas d'autre processus qui se démarque nettement comme c'est le cas pour le bambou.



Graphe 16 : Contribution différents processus pour poutre bois

H. AMÉLIORATIONS POSSIBLES

1. Discussion des résultats et points d'amélioration

Suite aux résultats présentés au point précédent, nous allons ici développer certains scénarios afin de réduire la différence entre les deux produits. D'une part en analysant plus en détail les trois processus ayant des impacts importants pour le bambou, et d'autre part en adaptant la modélisation du module pour le bois.

- ***Le bambou***

Pour le bambou, nous avons mis en évidence trois points critiques.

- Premièrement, la combustion des résidus de bambou. Il semble assez difficile de pouvoir modifier ce processus. En effet, puisqu'il n'existait pas de processus de combustion pour le bambou et que nous n'en connaissions pas les données, nous nous sommes basés sur un processus suisse. Les émissions sont donc plus que probablement sous-estimées.

  De plus, les résidus de bois constituent une source d'énergie directement disponible dans l'usine, le remplacement de la combustion par une autre source d'énergie semble donc peu probable.

  Enfin, notre modélisation ne prend pas en compte la colle qui se trouve dans certains résidus (comme les sciures), ce qui augmenterait les impacts.

  Une amélioration possible pourrait être l'installation de filtres sur la chaudière afin de minimiser les émissions. Cependant, comme il s'agit d'une petite installation, il faudrait également vérifier la faisabilité économique de cette solution. En cas de trop grands frais d'installation et de maintenance, le responsable de l'usine pourrait très bien abandonner cette option.

  Pour ces raisons, nous ne proposerons pas de scénario d'amélioration pour la combustion du bambou.

- Deuxièmement, l'utilisation de l'électricité pour la production. Comme nous l'avons précisé dans l'hypothèse (5), nous avons basé notre analyse sur le mix énergétique chinois. Dans le cas d'une utilisation des produits à base de bambou en Europe, il est possible que les chaînes de production y soient déplacées.

  Cela constituera notre **scénario 1**, qui sera basé sur l'utilisation du mix énergétique européen.

- Troisièmement, le transport. Le bambou est un matériau dont, nous l'avons vu, la Chine est le principal exportateur. Pour pouvoir modifier les valeurs de transport, il faudrait supposer une culture de bambou en Europe. Même si cela est théoriquement possible puisque certaines espèces de bambou peuvent résister au climat européen, il s'agit là d'une hypothèse très forte. En effet, cela demanderait une série d'analyses très vastes étant donné qu'il s'agirait d'implanter massivement une espèce exogène.

  Nous ne construirons donc pas de scénario sur ce point.

- ***Le bois***

Le fait d'obtenir des résultats variant d'un facteur 9 pousse à analyser de plus près le module bois utilisé comme comparaison.

➢ Tout d'abord, nous pouvons remarquer que nous comparons un module créé à partir de données d'une usine particulière pour un produit loin de l'industrialisation que l'on connaît pour le bois en Europe, la poutre en bambou, à un module très général basé sur des valeurs moyennes. Le module bambou comporte également beaucoup plus d'étapes, d'où la plus grande consommation d'énergie.

  Nous justifions cette comparaison en rappelant le but de notre ACV qui est avant tout de déterminer l'origine des impacts et leurs similitudes, ou non, avec ceux du bois en terme qualitatif et non quantitatif, ce qui ne serait pas très pertinent vu le peu de données disponibles pour le bambou. L'obtention de données plus précises demanderait pratiquement une investigation sur le terrain, ce qui n'est pas possible dans le cadre de ce travail.

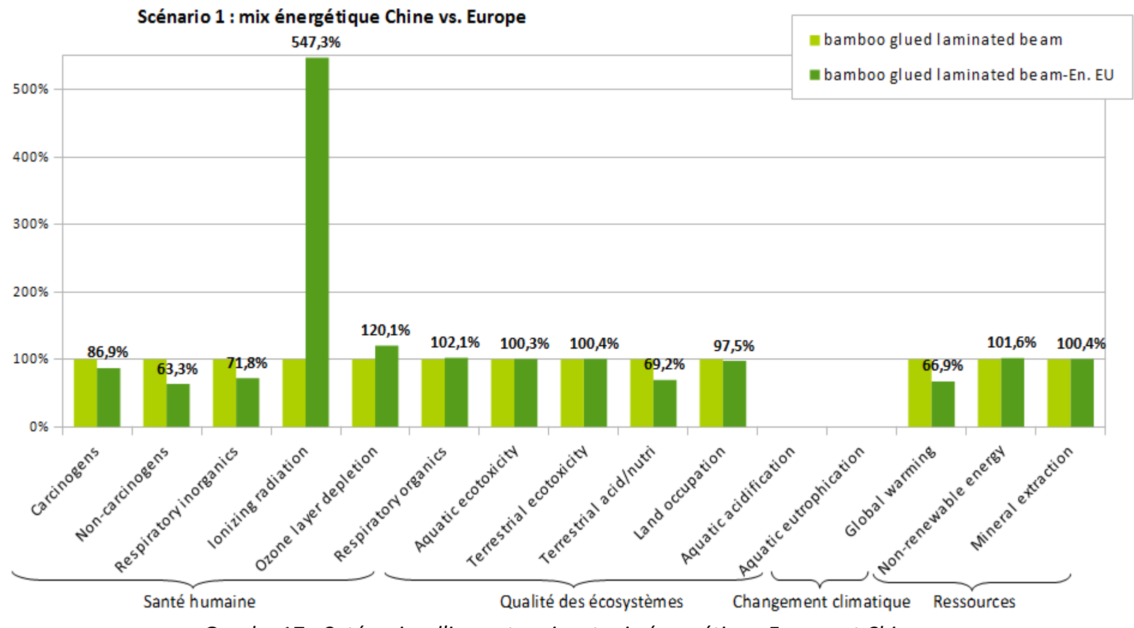
➢ Ensuite, si nous comparons les étapes de fabrication du SWB et du bois, nous pouvons remarquer que le SWB possède une étape de ponçage, ce qui n'est pas le cas pour le bois (le module choisi correspond à du bois brut).

  Notre **scénario 2** consistera donc à ajouter une étape de ponçage au module bois.

2. Scénario 1 : adaptation du mix énergétique

En adaptant le mix énergétique de la Chine vers l'Europe (Graphe 17), nous pouvons observer des variations majoritairement faibles, quelques diminutions moyennes (de l'ordre de 30%) pour la toxicité humaine non-cancérigène, les effets respiratoires, acidification/eutrophisation terrestre et le réchauffement global, ainsi qu'une nette augmentation (d'un facteur 5,5) pour les radiations ionisantes.

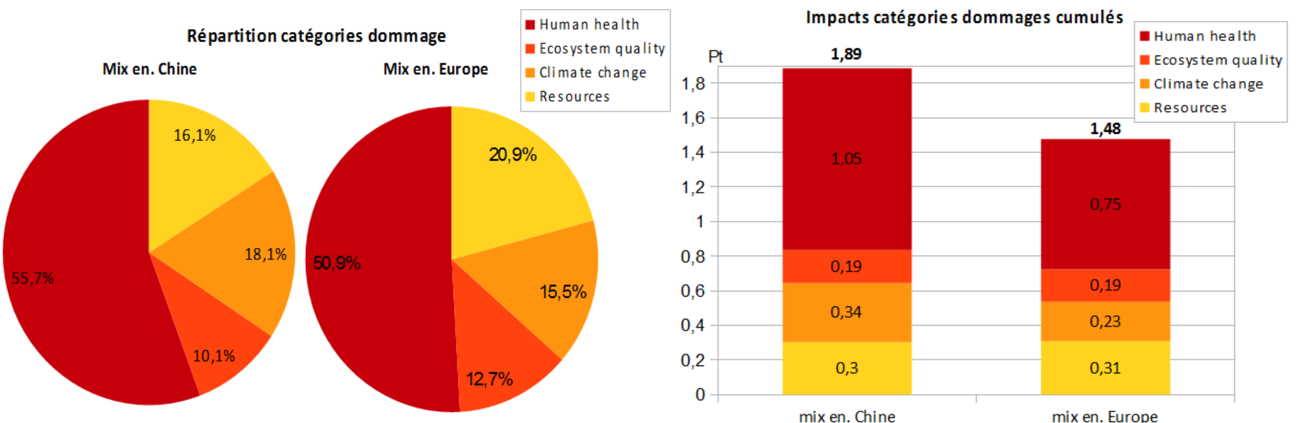
Ces résultats semblent logiques puisque la Chine base sa production d'énergie majoritairement sur le



Graphe 17 : Catégories d'impacts suivant mix énergétique Europe et Chine

charbon tandis que l'Europe se base également sur le nucléaire et le gaz [Huart : 2012].

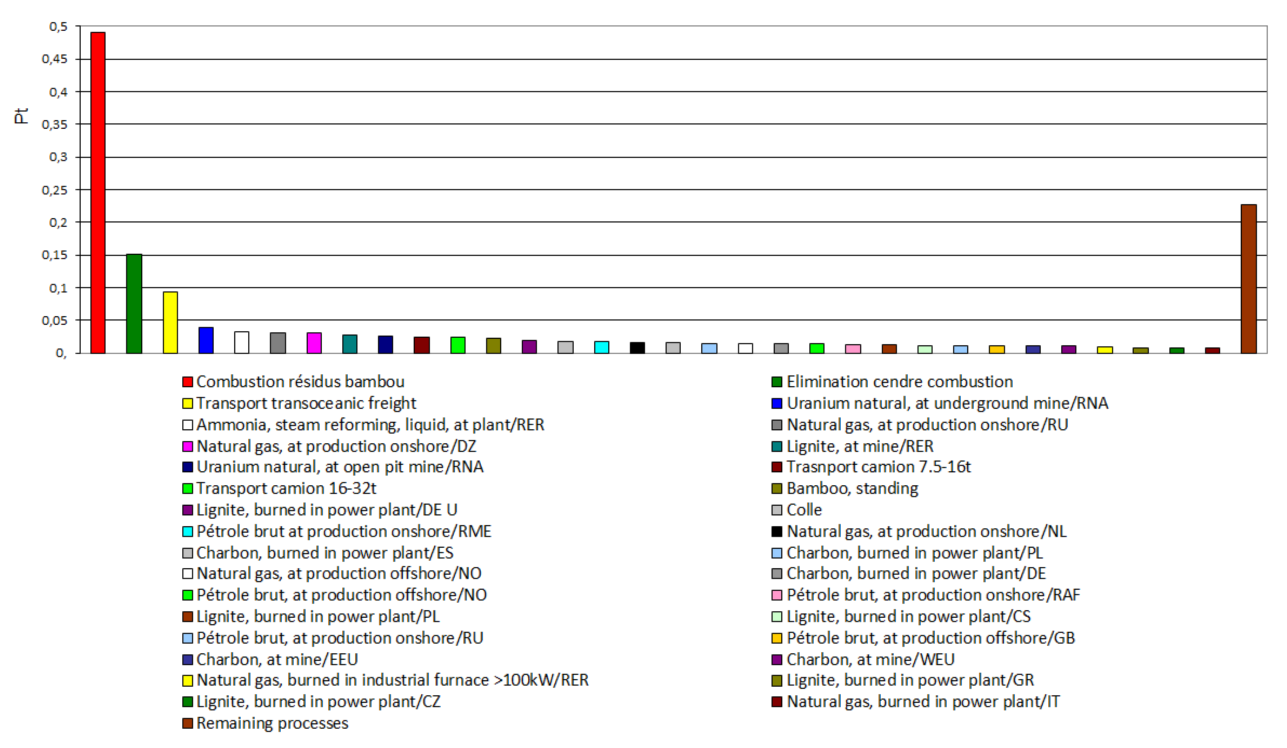
Pour ce qui est des impacts suivant les catégories de dommages, la répartition reste globalement identique (Graphe 18). Le score total d'impact diminue (Graphe 19). C'est la catégorie santé humaine qui possède la plus importante réduction, suivie par le changement climatique.



Graphe 18 : Répartition des catégories de dommages

Graphe 19 : Impacts cumulés des catégories de dommages

Si nous comparons le graphe des impacts en fonction des différents processus (Graphe 20) à celui que nous avions pour le mix énergétique chinois, nous retrouvons toujours, largement en première position, la combustion des résidus de bambou. La différence se situe pour les contributions suivantes où nous retrouvons d'abord le transport et ensuite seulement l'électricité.



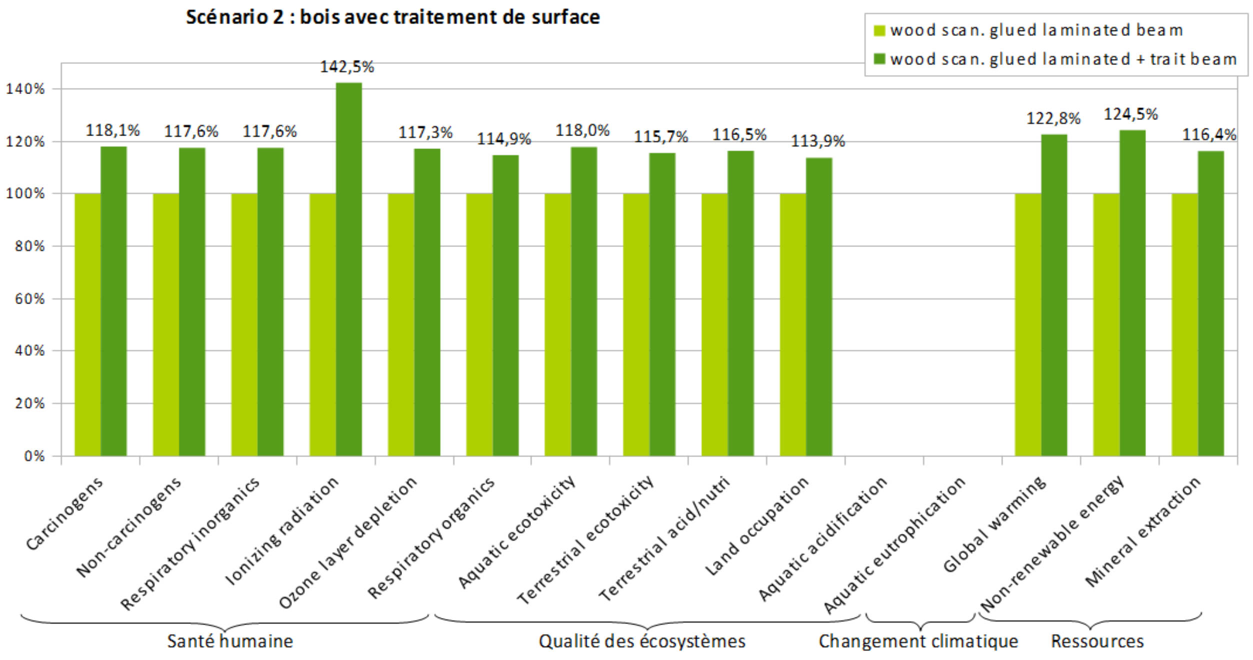
Graphe 20 : Contribution différents processus pour poutre bambou avec mix énergétique européen

Même si les impacts dus au mix énergétique sont moins importants, ils restent malgré tout

prépondérants puisque la consommation d'énergie reste inchangée.

3. Scénario 2 : adaptation module bois

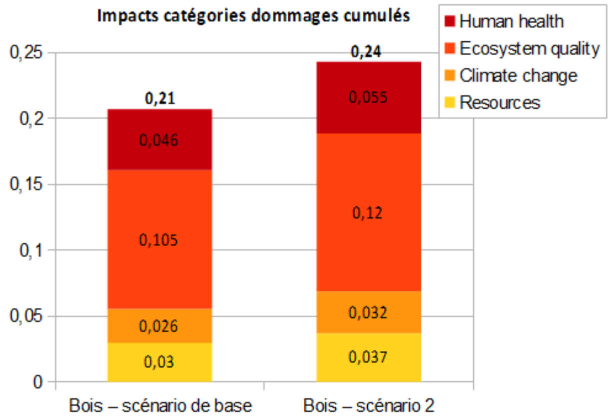
En ajoutant un traitement de surface au module bois (Graphe 21), nous pouvons voir une augmentation pour toutes les catégories d'impacts.



Graphe 21 : Catégories d'impacts suivant ajout d'un traitement de surface

Le score d'impact total augmente (Graphe 22), tout en conservant une contribution des différentes catégories globalement identique.

Il n'y a pas non plus de modification importante dans le graphe des impacts par processus.



Graphe 22 : Impacts cumulés des catégories de dommages

I. Conclusion

1. Résultat ACV

Avant de tirer les conclusions de cette analyse, il convient de rappeler les hypothèses sur lesquelles elle se base ainsi que les limites qu'elles représentent :

- La première hypothèse basait l'analyse sur un rapport de l'INBAR, autrement dit, sur une chaîne de fabrication bien précise. L'analyse se base en conséquence, d'une part sur des valeurs moyennes pour le bois issues de Ecoinvent, et d'autre part sur des données particulières. Il est donc certainement possible de trouver d'autres cas particuliers, à la fois pour le bambou et pour le bois, ayant des impacts plus ou moins importants. Ce qui pourrait modifier entièrement les résultats de l'étude.
- La deuxième hypothèse définit les limites du système : l'analyse ne considère que les étapes en aval de la fabrication de la poutre lamellé-collé. Nous avions considéré que les impacts dus à la fabrication seraient identiques pour le bois et pour le bambou. Cependant, puisque les poutres n'ont pas les mêmes dimensions, il y aura forcément des différences, principalement en faveur du bambou. En effet, si la section de la poutre est moins importante, il faudra moins de colle, moins d'énergie pour le séchage, moins de produits de traitement, ...

  En ce qui concerne l'utilisation et la fin de vie, des différences peuvent également exister et venir modifier les résultats en cas de modification des limites du système.
- La troisième hypothèse explique la non considération des machines. Lors de l'adaptation du module bois, nous avons pu remarquer que les valeurs pour la prise en compte des machines étaient très faibles, ce qui aurait été le cas également pour le bambou. L'intégration des machines dans l'analyse ne devrait donc pas modifier considérablement les résultats.
- La quatrième et dernière hypothèse concerne l'utilisation du mix énergétique chinois. Le choix d'un autre mix peut modifier les résultats, comme nous l'avons vu avec une diminution des impacts pour l'utilisation du mix européen.

Tout en gardant ces hypothèses en tête, nous pouvons maintenant conclure sur les résultats de l'ACV.

De manière générale, les impacts pour la poutre en bois sont moins importants pour toutes les catégories de dommages et pour toutes les catégories d'impacts excepté l'occupation du sol.

2. Alternatives

Nous avons pu mettre en évidence les 3 grandes sources d'impacts pour la poutre en bambou : la combustion des résidus, le transport et la consommation d'électricité. Nous avons discuté des possibilités d'amélioration en vue de diminuer les impacts et en avons ressorti les points suivants :

- La combustion semble difficilement remplaçable, et l'ajout de filtre est avant tout à discuter d'un point de vue économique.

- Le bambou étant produit principalement en Chine, les alternatives de transport sont quasi inexistantes.
- La consommation d'électricité sur base du mix énergétique européen permet de diminuer les impacts, mais la quantité d'énergie nécessaire reste toujours importante.

Il est également important de rappeler que notre comparaison se fait sur une application particulière (une poutre en lamellé-collé) pour un matériau particulier (la SWB). Ce qui signifie :

- Que d'autres matériaux, comme nous l'avons vu au dans le chapitre précédent, peuvent être obtenus sur base du bambou. Leur fabrication génère d'autres schémas d'impacts qui pourraient être plus intéressants que le SWB.
- Qu'il existe peut-être d'autres produits pour lesquels le SWB pourrait être une alternative écologiquement intéressante. Par exemple pour les bois tropicaux comme l'Azobe dont les caractéristiques techniques sont plus proches de celles du SWB (masse volumique de 1070 kg/m³ pour une humidité de 12% [Cirad : 2012]).

3. Risques en cas d'utilisation

Les mauvais résultats n'impliquent pas forcément la non utilisation du produit. Le développement durable et les produits respectueux de l’environnement étant relativement à la mode, le bambou représente un réel avantage marketing.

Le bambou a une image très verte, notamment grâce à sa croissance rapide et aux avantages que sa culture permet, à laquelle le consommateur peut être sensible. Il faut cependant rester très critique à ce sujet : si le matériaux de base (le chaume de bambou) est intéressant, le produit transformé (ici, le SWB) ne l'est pas forcément.

Il faut également faire attention au point de vue adopté. En effet, si le seul critère utilisé pour déterminer le caractère « écologique » du SWB par rapport au bois est l'occupation du sol, les résultats seront bien différents, en comparaison avec une étude plus globale.

A titre d'exemple, la société qui développe les poutres en lamellé-collé bambou dont nous parlons dans ce travail présente son produit comme étant à base de bambou, et donne les qualités du bambou dont nous avons parlé en début de travail (stabilité sol, croissance rapide, etc), ce qui en fait un matériau écologiquement avantageux. Toutes ces données sont bien sûr exactes or, nous savons que la transformation du chaume en SWB nécessite de nombreuses étapes, dont l'ajout de colle, ce qui est nettement moins « écologique ».

La documentation explicative sur les poutres mentionne également la quantité faible d'énergie nécessaire pour sa fabrication, en comparaison avec le bois. Il semble donc y avoir contradiction avec les résultats de ce travail. Cependant, comme nous venons de le voir, il sera toujours possible de trouver des données particulières ou de prendre des hypothèses qui donneront les résultats voulus.

CONCLUSIONS

Tout au long de ce travail, nous avons suivi différentes pistes pour tenter de répondre à notre question de recherche : *L'utilisation du bambou comme matériau de construction peut-elle représenter une alternative écologiquement acceptable aux matériaux dits « standards » en Europe ?* En nous basant sur les différents points abordés, nous allons maintenant tenter de structurer une proposition de réponse.

De manière générale, une augmentation de l'utilisation du bambou poserait deux problèmes majeurs :

Premièrement, comme nous l'avons vu en début de travail, il existe une certaine pression sur les ressources de bambou. Des forêts sont transformées en monocultures, ce qui engendre : une perte de biodiversité, une perte de résistance des milieux cultivés et une baisse de productivité de la plantation. Si l'utilisation du bambou venait à augmenter, l'exploitation s'intensifierait. Ce qui renforcerait les pressions sur les écosystèmes. Particulièrement en Chine où l'exploitation du bambou est très importante, des recommandations ont été proposées par l'INBAR afin d'améliorer la biodiversité de leurs forêts de bambou. Toutefois, ces conseils ont besoin de temps pour pouvoir être mis en œuvre et donner naissance à une politique forestière durable. Dans la situation actuelle, un trop grand accroissement de la demande en bambou pourrait détruire les faibles structures existantes et conduire à des situations problématiques comme il en existe pour les bois tropicaux.

Deuxièmement, l'utilisation massive de produits à base de bambou pourrait générer des impacts plus importants. Nous basons cette affirmation sur les résultats de l'ACV présentés dans ce travail. Une fois de plus, il ne faut pas perdre de vue que ces résultats sont basés sur certaines hypothèses (page 43) qui, nous en avons discuté, pourraient modifier ces derniers.
L'ACV a mis en avant que, pour le lamellé-collé, les impacts sont beaucoup plus importants pour une utilisation du bambou que pour le bois, et ce pour la quasi-totalité des catégories d'impacts analysées. Cela est très interpellant puisque le bambou a une image très verte et écologique aux yeux du grand public. Cette image est alimentée par la publicité faite par les producteurs de tels matériaux. Elle s'appuie surtout sur les propriétés naturelles des chaumes de bambou, mais ne prend pas en considération les autres aspects comme les multiples étapes de transformation et de transport que nécessite l'élaboration de ces matériaux. L'ACV montre en effet que le bambou est bien meilleur en ce qui concerne l'occupation du sol. Mais cet avantage n'est pas suffisant pour compenser tous les autres impacts négatifs qui sont prépondérants au niveau global.

Si ces conclusions semblent bien pessimistes, nous pouvons tout de même les contraster. En effet, nous l'avons assez répété, ce travail se concentre surtout sur un seul matériau et une seule utilisation. Il est probable que d'autres utilisations mettant en œuvre des matériaux plus critiques, comme le bois tropical, pourraient donner des résultats plus encourageants.

L'utilisation du bambou n'est donc pas à rejeter en bloc. Il existe cependant encore de nombreuses zones d'ombre qu'il y a lieu d'éclairer avant de se lancer dans une utilisation à plus grande échelle du bambou

en tant que matériau de construction. Ce délai nécessaire n'est pas une mauvaise chose. En effet, il permettra à la fois aux pays exportateurs de bambou de mettre en place les structures forestières nécessaires pour subvenir à une demande plus importante, mais également aux producteurs occidentaux de mieux se familiariser avec ce nouveau matériau. Et cela aussi bien d'un point de vue technique, en acquérant de nouvelles connaissances, que d'un point de vue environnemental, en déterminant les impacts, positifs ou négatifs, que ces utilisations pourraient apporter au secteur de la construction.

Pour terminer, nous pouvons encore ajouter que ce travail est un bon exemple pour illustrer les idées reçues en termes d'environnement, le bambou n'étant sûrement qu'un exemple parmi d'autres. La comparaison de deux produits (dans notre cas : le lamellé-collé en bambou et en bois) ne peut pas se limiter à quelques aspects mais doit être globale en considérant le plus d'impacts possible, tout en délimitant clairement le contexte dans lequel cette comparaison est effectuée.
Enfin, le consommateur soucieux de l'environnement restera critique vis-à-vis des arguments avancés par les producteurs qui manipulent parfois les informations afin de rendre leurs produits plus verts.

Annexe A : détails dimensionnement poutres

Voici le calcul détaillé de la détermination des poutres pour l'unité fonctionnelle de l'ACV. Le dimensionnement se base sur le cours de Ir. R. Matriche donné en 2*ième* année de master en Ingénieur Civil des Constructions [Matriche : 2011].

A. Poutre lamellé-collé bois

Pour ce dimensionnement, nous considérons une poutre GL24h dont les propriétés dans le Tableau 4 dans des conditions de locaux intérieurs chauffés (classe climatique CC1).

1. Charges

Les charges supportées par la poutre sont de deux types (Illustration 52) :

1. Les **charges permanentes** comportant :
   - Le **poids propre de la poutre** : pour du GL24h, nous considérons une masse volumique de 380 kg/m³ [Matriche : 2011]. Pour une section de poutre de 0,6 m sur 0,2 m, cela correspond à une charge répartie de 45,6 kg/m ou encore 0,456 kN/m.
   - Le **poids du plancher** : en faisant l'hypothèse d'une poutre isostatique et d'un entre-axe entre 2 poutres de 5 m, pour une charge permanente de plancher de 50 kg/m², cela donne : $50 \,.\, \frac{5}{2} = 125$ kg/m ou encore 0,125 kN/m.
2. La **charge variable** : c'est la charge que nous cherchons à déterminer. Nous la noterons *x*.

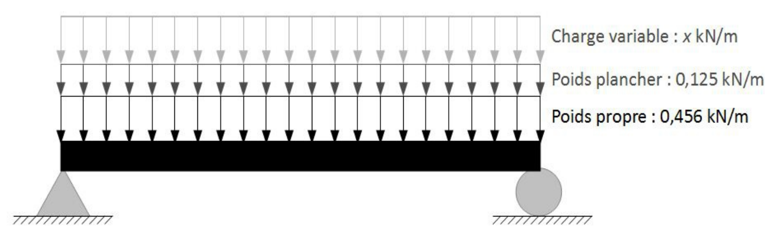


Illustration 52: Charges sur la poutre en bois lamellé-collé

2. Vérification ELU

Nous commençons par vérifier la poutre aux états limites ultimes. Pour ce faire, il faut d'abord évaluer la valeur de calcul des actions (p) en pondérant les différentes charges appliquées avec les coefficients partiels de sécurité :

$$p = 1{,}35 \text{ x charges permanentes} + 1{,}5 \text{ x charge variable} = 1{,}35 \,.\, (0{,}456 + 0{,}125) + 1{,}5 \,.\, x$$

Pour que l'ELU soit satisfait, il faudra que $M_{Sd} \leqslant M_{Rd}$, avec :

- M_{Sd} le moment fléchissant agissant valant : $M_{Sd} = \frac{p \,.\, l^2}{8}$ où p est la valeur de calcul des actions et l la portée de la poutre (12 m).
- M_{Rd} le moment fléchissant résistant valant : $M_{Rd} = f_{m,d} \,.\, k_d \,.\, W_z$ où

– $W_z = \frac{I}{h/2}$ avec $I = \frac{b.l^3}{8} = 3{,}6.10^{-3}\ m^4$

$h/2 = 0{,}3\ m$

→ $W_z = 0{,}012\ m^3$

– $k_d = 1$ car $\gamma_{r,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_c}} = 0{,}74 \leqslant 0{,}75$ avec $\sigma_c = \frac{0{,}9.E.b^2}{m.h.l}$

– $f_{m,d} = \frac{k_a.f_{m,k}}{\gamma_M}$ avec $f_{m,k} = 24$ Mpa (contrainte flexion caractéristique)

$\gamma_M = 1{,}3$ (coefficient partiel pour combinaison fondamentale)

k_a, coefficient d'adaptation qui modélise la perte de résistance du bois au cours du temps en fonction de la durée des sollicitations et les conditions climatiques ambiantes. Dans le cas de sollicitations variables et permanentes, il faudra calculer k_a par une moyenne pondérée. Comme k_a est fonction de la charge répartie qui n'est pas encore connue, il faudra procéder par calcul itératif.

Par calcul itératif, nous obtenons, pour k_a = 0,745, $\boxed{x = 4{,}5\ kN/m}$.

Ce qui vérifie bien la condition ELU $M_{Sd} = 163\ kN/m \leqslant M_{Rd} = 165\ kN/m$.

3. Vérification ELS

Pour la vérification ELS, les coefficients partiels valent 1, ce qui signifie que :

p = charges permanentes + charge variable

Pour que l'ELS soit satisfait, il faut que $u_{fin} \leqslant u_{inst}.(1+k_{def})$, avec :

- $u_{fin} = \frac{L}{500} = 0{,}024\ m$, la flèche admissible
- $u_{inst} = \frac{5.p.l^4}{384.E.I}$, la flèche instantanée

$1+k_{def}$, facteur de fluage qui, comme k_a , dépend de la durée des sollicitations et des conditions climatiques ambiantes, s'obtient par une moyenne pondérée et dépend donc de la charge variable qui doit encore être déterminée. Il faudra donc ici aussi un calcul itératif.

Par calcul itératif, nous obtenons, pour k_{def} = 0,49, $\boxed{x = 0{,}75\ kN/m}$.

Ce qui vérifie bien la condition ELS $u_{fin} = 0{,}024\ m \leqslant u_{inst}.(1+k_{def}) = 0{,}0237\ m$.

4. Détermination charge variable

Comme il est nécessaire que la charge variable appliquée réponde à la fois aux critères ELU et ELS, nous prendrons la plus petite valeur, c'est à dire $x = 0{,}75\ kN/m$ (pour k_{def} = 0,49 et k_a = 0,66).

B. Poutre lamellé-collé bambou

Maintenant que nous avons déterminé la charge variable à considérer, nous pouvons déterminer la section de la poutre de lamellé-collé en bambou nécessaire. L'inconnue est donc cette fois la base de la poutre que nous appellerons *b*. En effet, la hauteur de la poutre sera considérée comme constante.

1. Charges

Les charges supportées par la poutre sont de deux types (Illustration 53) :

1. Les **charges permanentes** comportant :
   - Le **poids propre de la poutre** : le bambou lamellé-collé a une masse volumique de1100 kg/m³ [3B structure : s.d.]. Pour une section de poutre de 0,6 m sur *b* m, cela correspond à une charge répartie de *b*.660 kg/m ou encore *b*.6,6 kN/m.
   - Le **poids du plancher** : (même valeur que pour la poutre en lamellé-collé bois) 0,125 kN/m.
2. La **charge variable** : (la charge qui vient d'être déterminée) 0,75 kN/m

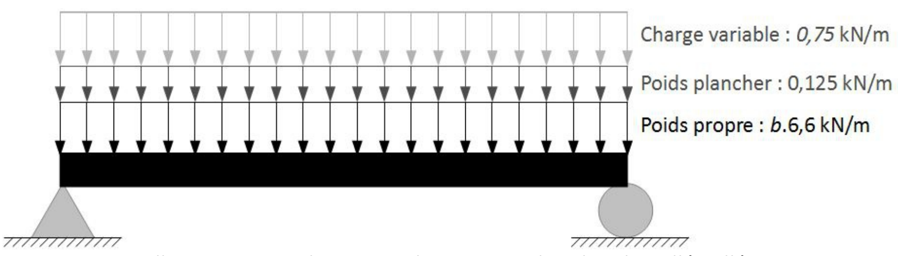


Illustration 53: Charges sur la poutre en bambou lamellé-collé

2. Vérification ELU

Suivant le même principe de calcul que pour le lamellé-collé bois, un calcul itératif permet de déterminer les dimensions de section admissible, soit $\boxed{b = 0{,}11 \text{ m}}$.

Ce qui vérifie bien la condition ELU $M_{Sd} = 68 \text{ kN/m} \leqslant M_{Rd} = 73 \text{ kN/m}$.

3. Vérification ELS

Suivant le même principe de calcul que pour le lamellé-collé bois, un calcul itératif permet de déterminer les dimensions de section admissible, soit $\boxed{b = 0{,}15 \text{ m}}$.

Ce qui vérifie bien la condition ELS $u_{fin} = 0{,}024 \text{ m} \leqslant u_{inst}.(1+k_{def}) = 0{,}0238 \text{ m}$.

4. Choix dimension section

Comme les deux critères (ELU et ELS) doivent être remplis, nous prenons la grandeur la plus grande, c'est-à-dire b = 0,15 m. Les dimensions de la poutre de bambou sont donc : 0,15 x 0,6 x 12 m. Soit une réduction de 25% en volume.

C. SYNTHÈSE

Les dimensions des poutres sont donc les suivantes :

	Bois	Bambou
Dimensions [m x m x m]	0,2 x 0,6 x 12	0,15 x 0,6 x 12
Volume [m³]	1,44	1,08
Masse [kg]	547,2	1188

ANNEXE B : RÉCAPITULATIF DES DONNÉES ACV

Plantation bambou – Bamboo standing

Input :

CO_2 fixé	1,65 kg
Occupation annuelle du sol	0,00014 ha/kg
Transformation (état initial)	État inconnu
Transformation (étant transformé)	Forest Intensive

Output :

Bamboo standing	1 kg

Chaumes 1 – Bamboo harvested

Input :

Bamboo standing	1,18 kg
Utilisation « chainsaw »	6 s

Output :

Bamboo harvested	1 kg
Résidus	0,18 kg

Chaume 2 – Bamboo at plant

Transport 1 :

Distance	0,015 tkm
Type transport	Camion 5 t

Transport 2 :

Distance	0,3 tkm
Type transport	Camion 8 t

Lamelles bambou – Bamboo strip

Input :

Bamboo harvested	1,54 kg
Stripping	0,0066 h
Planing	0,013 h
Splitting	0,0038 h
Carbonization	0,0198 h
Drying	0,0476 h
Crushing	0,0099 h

Output :

Bamboo strip	1 kg
Résidus	0,54 kg

- **Découpe lamelles – stripping**

Stripping machine	5,5 kW

- **Rectification lamelles – planing**

Planning machine	17,5 KW

- **Dédoublement lamelles – splitting**

Splitting machine	5,5 KW

- **Carbonisation – carbonization**

Carbonizing boiler	1,5 KW
2-ton boiler	3,94 kW
Use steam	140 kWh

- **Séchage – drying**

Drying chamber	15 KW
2-ton boiler	1,64 kW
Use steam	338 kWh

- **Préparation encollage - crushing**

Crushing machine	5,5 KW

Poutre bambou – Bamboo beam SWB

Input :

Bamboo strip	0,849 kg
Colle	0,151 kg
Pressing	0,0026 h
Glue activating	0,0018 h
Sawing	0,001 h

Output :

Bamboo beam	1 kg

- **Pressage poutre – pressing**

Press	27,5 KW

- **Activation colle – glue activating**

Oven	50 KW

- **Sciage – sawing**

Sawing machine	11 KW

Planches bambou 1 – Bamboo plank SWB

Input :

Bamboo beam	1,295 kg
Sawing	0,003 h
Sanding	0,0009 h

Output :

Bamboo plank	1 kg
Sawdust	0,295 kg

- **Sciage – sawing**

Sawing machine	11 KW

- **Ponçage – sanding**

Sanding machine	72,5 KW

Planches bambou 2 – Bamboo plank SWB BE

Transport 1 :

Distance	0,3 tkm
Type transport	Camion 28 t

Transport 2 :

Distance	19,208 tkm
Type transport	Transoceanic freight

Transport 3 :

Distance	0,3 tkm
Type transport	Camion 28 t

Annexe C : détails résultats ACV

A. Catégories d'impacts

Voici les résultats obtenus dans les unités de chaque catégorie telles que définies dans le Tableau 6 en page 56 pour les différentes catégories d'impacts :

Tableau 9: Résultats par catégorie d'impacts

Catégorie d'impacts		Unité	Poutre bambou	Poutre bambou scénario 1	Poutre bois	Poutre bois scénario 2
Toxicité humaine	cancérigène	[kg C_2H_3Cl eq]	28,52	24,77	1,89	2,23
	non cancérigène	[kg C_2H_3Cl eq]	164,43	104,05	4,1	4,82
Effets respiratoires		[kg $PM_{2.5}$ eq]	9,85	7,08	0,44	0,52
Radiation ionisante		[Bq C-14 eq]	18 547	101 508	6 800	9 692
Destruction de la couche d'ozone		[kg CFC-11 eq]	1,93E-04	2,31E-04	3,38E-05	3,97E-05
Formation de photo-oxydants		[kg C_2H_4 eq]	1,74	1,78	0,22	0,25
Acidification aquatique		[kg SO_2 eq]	36,99	19,7	1,96	2,34
Eutrophisation aquatique		[kg PO_4 P-lim]	0,59	0,82	4,58E-02	6,01E-02
Acidification/eutrophisation terrestre		[kg SO_2 eq]	142,76	98,78	11,24	13,09
Ecotoxicité terrestre		[kg triéthylène glycol éq]	264 368	265 494	12 580	14 559
Ecotoxicité aquatique		[kg triéthylène glycol éq]	717 581	719 857	28 109	33 166
Occupation du sol		[m² éq terre arable]	306,45	298,76	1 219	1 387
Changement climatique		[kg CO_2]	3 383	2 264	255,1	313,34
Énergie non renouvelable		[MJ primaire]	46 064	46 801	4 498	5 598
Extraction de minerais		[MJ surplus]	21,5	21,57	2,22	2,58

B. Catégories de dommages

Voici les résultats obtenus dans les unités de chaque catégorie telles que définies dans le Tableau 7 en page 57 pour les différentes catégories de dommages :

Tableau 10: Résultats par catégorie de dommages

Catégorie de dommages	Unité	Poutre bambou	Poutre bambou scénario 1	Poutre bois	Poutre bois scénario 2
Santé humaine	[DALY]	7,40E-03	5,34E-03	3,28E-04	3,87E-04
Qualité des écosystèmes	[PDF.m².an]	2 610	2 565	1 441	1 643
Changement climatique	[kg CO_2]	3 383	2 264	255,1	313,34
Ressources	[MJ]	46 085	46 823	4 500	5 601

Ces résultats sont obtenus en effectuant la somme des valeurs présentées dans le Tableau 9 pondérées des facteurs de dommages donnés dans le Tableau 7.

Par exemple, pour la catégorie santé humaine pour la poutre en bambou :

$$\text{Dommage} = (28{,}52*2{,}8*10^{-6})+(164{,}43*2{,}8*10^{-6})+(9{,}85*7*10^{-4})+(18\,547*2{,}1*10^{-10})+(1{,}93*10^{-4}*1{,}05*10^{-3})+(1{,}74*2{,}13*10^{-6})$$

$$= 7{,}44*10^{-3}\ \text{DALY}^{48}$$

48 Résultat légèrement différent en raison des erreurs d'arrondis lors du calcul à la main.

Les autres valeurs peuvent être obtenues suivant le même raisonnement. Il faut toutefois noter que pour la qualité des écosystème, l'acidification et l'eutrophisation aquatique n'ayant pas encore de facteur de dommage, ces catégories n'entrent pas dans le calcul.

Pour la catégorie de dommages ressources, il n'est pas nécessaire d'utiliser de facteur de dommage puisque les valeurs données pour les catégories d'impacts sont déjà en MJ et non en kg de fer ou kg de pétrole brut.

C. Normalisation

En divisant les valeurs du Tableau 10 par les facteur de normalisation donnés dans le Tableau 8 en page 58, nous obtenons les résultats suivants :

Tableau 11: Résultats normalisés par catégorie de dommages

Catégorie de dommages	Unité	Poutre bambou	Poutre bambou scénario 1	Poutre bois	Poutre bois scénario 2
Santé humaine	[Point]	1,05	0,75	0,046	0,055
Qualité des écosystèmes	[Point]	0,19	0,187	0,105	0,12
Changement climatique	[Point]	0,342	0,229	0,026	0,032
Ressources	[Point]	0,303	0,308	0,03	0,037

Par exemple, pour la catégorie santé humaine pour la poutre en bambou :

Normalisation = $\frac{7{,}4.10^{-3}}{0{,}0071}$ = 1,042 Point[49]

D. Pondération

Les facteurs de pondération ayant tous une valeur unitaire, les résultats pondérés sont identiques à ceux du Tableau 11. Nous ne les présenterons donc pas à nouveau.

Voici toutefois le tableau des résultats cumulés :

Tableau 12: Résultats cumulés

	Poutre bambou	Poutre bambou scénario 1	Poutre bois	Poutre bois scénario 2
Résultat cumulé [Point]	1,89	1,48	0,21	0,24

49 Encore une fois, le résultat est légèrement différent. Probablement pour la même raison qu'au point précédent.

Références Bibliographiques

Articles scientifiques

- Brezet H., van der Lugt P. et Vogtländer J., 2010, "The sustainability of bamboo products for local and Western Europeanapplications. LCAs and lan d-use", *Journal of Cleaner Production 18*, 1260-1269p.
- Daytonb D.C., Hamesb B., Scurlocka J.M.O. , 2000, "Bamboo: an overlooked biomass resource?", *Biomass and Bioenergy 19*, 229-244p.
- Ducey M. et al., 2011, "Bamboo for people, Mountain gorillas, and golden monkeys: Evaluating harvestand conservation trade-offs and synergies in the Virunga Volcanoes", *Forest Ecology and Management 267*, 163-167p.
- Finnveden G. et al., 2009, "Recent developments in Life Cycle Assessment", *Journal of Environmental Management 91*, 1-21p.
- Fu J., 2001, "Chinese Moso Bamboo:Its Importance", *B A M B O O · The Magazine of The American Bamboo Society - vol 22*, 5-7p.
- Ghavami K., 2005, "Bamboo as reinforcement in structural concrete elements", *Cement & Concrete Composites 27*, 637-649p.
- Guinée J. et al., 2011, "Life Cycle Assessment : Past,Present, and Future", *Environmental Science Technology 45*, 90-96p.
- Isagi Y. et al., 1997, "Net production and carbon cycling in a bamboo Phyllostachys pubescens stand", *Plant Ecology 130*, 41-52p.
- Janssen J.J.A., van den Dobbelsteen A.A.J.F. et van der Lugt P., 2005, "An environmental, economic and practicl assassment of bamboo as a building material for supporting structures", *Construction an Building Materials 20*, 648-656p.
- Klaase D., A.A.J.K. van den Dobbelsteen et A.C. van der Linden, 2002, "Sustainability needs more than juste smart technology", *Advances in Building Technology, Volume 2*, 1501-1508p.
- Piel F. et al., 2007, "Coniferous round wood imports from Russia and Baltic countries to Belgium. A pathway analysis for assessing risks of exotic pest insect introductions", *Diversity and Distributions, 14*, 318-328p.

Publications organismes

- Brezet H., van der Lugt P. et Vogtländer J., 2009, "Bamboo, a sustainable Solution for Western Europe Desing Cases, LCAs and Land-use", INBAR Technical Report 30, 87p.
- Buckingham K. et al., 2010, "Bamboo and Climate Change Mitigation", INBAR Technical Report 32, 47p.
- Bystriakova N. et al., 2003a, "Bamboo Biodiversity: Africa, Madagascar and the Americas", UNEP-WCMC Report, 89p.
- Bystriakova N. et al., 2003b, "Bamboo biodiversity : Information for planning conservation and management in the Asia-Pacific region", UNEP-WCMC Report, 72p.
- Chaomao H. et Yuming Y., 2010, "China's Bamboo | culture/ressources/cultivation/utilisation.", INBAR Technical Report 33, 227p.
- Henley G. et Yiping L., 2010, "Biodiversity in Bamboo Forests: a policy perspective for long term sustainability", Publication INBAR, 17p.
- Indian Plywood Industries Research and Training Institute (IPIRTI), s.d., "Transfert of Technology Model : Bamboo Mat Board", TOTEMs database, 39p.
- Janssen J.J.A., 2000, "Designing and Building with Bamboo", INBAR Technical Report 20, 211p.
- United Nations industrial Development Organization (UNIDO), 2012b, "Bamboo Training Manual 5 : Industrial Products", Publication UNIDO, 34p.
- United Nations industrial Development Organization (UNIDO), 2012a, "Bamboo Training Manual 1 : Bamboo Harvesting and Preservation", Publication UNIDO, 46p.

Mémoires et notes de cours

- Boucher J., 2006, "Développement d'une poutre de béton armé de bambou préfabriquée pour l'habitat urbain de Hanoi", Mémoire de fin d'étude, Québec, Université Laval, -p.
- Degrez M. , 2012, "Analyse du cycle de vie : qu'est-ce ? pour quoi faire ? comment faire ?", Note de cours, Bruxelles, ULB, 49p.
- Franssen J. M. , 2007, "Constructions en bois", Note de cours, Liège, ULg, 157p.
- Gamme X. , 2010, "Assessment of the Reduced Bearing Capacity of Checked Glued Laminated Timber Beams and Repair Methods ", Mémoire de fin d'étude, Bruxelles, ULB, 37p.
- Hargot B., 2009, "Etude,réalisation et analyse de poutres lamellé-collé en bambou", Mémoire de fin d'étude, Bruxelles, ECAM, 37p.
- Huart M., 2012, "Energie et environnement :Source d'énergie renouvelable", Note de cours, Bruxelles, ULB, 88p.
- Kallaway E., 2010, "Bamboo as a New Fiber Source in the U.S. Paper Industry: A Feasibility Analysis for Booshoot Gardens, LLC", Mémoire de fin d'étude, Eugene, University of Oregon, 84p.
- Khare L., 2005, "Performance evaluation of bamboo reinforced concrete beams", Mémoire de fin d'étude, Arlington, University of Texas, 100p.
- Matriche R., 2011, "Pathologies, rénovation et réhabilitation des structures", Notes de cours, Bruxelles, ULB, 324p.
- Xiaobo L., 2004, "Physical, chemical and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing",

Mémoire de fin d'étude, Baton Rouge, Louisiana State University - School of Renewable Natural Resources, 76p.

Livres

- Abdelmalki L. et Mundler P., 2010, *Le point sur : Economie de l'environnement et du développement durable*, Bruxelles: de boeck, 219p.
- Frey F., 2006, *Analyse des structures et milieux continus : mécanique des structures (volume 2)*, Lausane: Presses Polytechniques et Universitaires Romanes, 452p.
- Jolliet O et al., 2005, *Analyse du cycle de vie : comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 112p.
- Melquiot P., 2003, *1001 mots et abréviations de l'environnement et du développement durable*, Béziers: Recyconsult, 192p.
- Roy J.-P. et Blin-Lacroix J.-L., 2011, *Dictionnaire professionnel du BTP (3ème édition)*, Paris: Eyrolles, 828p.
- Schleifer K., 2011, *Bambou : architecture, écologie, design, objets, mobilier, contemporain, tradition, artisanat*, Paris: Ed. Place des Victoires, 383p.

Documentation logiciel et base de données

- Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), 2012, "Azobe", Tropix® 7, 4p.
- Frischknecht R. et al., 2007, "Overview and Methodology", Ecoinvent Report N°1, 77p.
- Goedkoop M. et al., 2008, "SimaPro Database Manual - Methods library", Documentation Simapro7, 52p.
- Humbert S. et al., 2007, "Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods", Ecoinvent Report N°3, 151p.
- M. Goedkoop et al., 2010, "Introduction to LCA with SimaPro 7 ", Documentation Simapro7, 88p.
- Spielmann M. et al., 2007, "Transport Service", Ecoinvent Report N°14, 237p.
- Système d'Information Taxonomique Intégré (SITI), 2012, "SITI*Amérique du Nord : Phyllostachys edulis", Base de données en ligne, 1p.
- United States Department of Agriculture (USDA), s.d., "Phyllostachys edulis", Germplasm Resources Information Network - (GRIN - Online Database), 1p.

Normes

- ISO, 2006b, *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines* , 54p .
- ISO, 2006a, *ISO 14040 International Standard. In: Environmental Management –Life Cycle Assessment – Principles and Framework. International Organisationfor Standardization*, 28p .

Documents PDF

- 3B structure, s.d., *Glulam Bamboo - Engineered Bamboo Technologies*, PDF en ligne, 20p, <http://www.3b-structure.com/DOWNLOADS/3B.pdf>, consulté le 21 juillet 2012.
- Centre Scientifique et Technique de la Contruction (CSTC), 2010, *Rapport d'essais*, PDF en ligne, 6p, <bhargot@3b-structure>, consulté le 14 juin 2012.
- Feing Kwong Chan C. et Sanna C., 2009, *Le bambou*, PDF en ligne, 15p, <http://data0.ek.la/jackyquetzalyne-monespacevert/mod_article2052944_2.pdf>, consulté le 4 juin 2012.
- Gielis J., s.d., *Future possibilities for bamboo in European agriculture*, PDF en ligne, 10p, <http://www.bamboonetwork.org/downloads/gielis01.pdf>, consulté le 4 juin 2012.
- Gilet L., s.d., *Réalités technologiques et écologiques du bambou*, PDF en ligne, 3p, <http://meets.free.fr/Downloads/SujetsDivers/ECOLOGIE/Tout_sur_le_bambou_format%C3%A9.pdf>, consulté le 24 juin 2012.
- Goubie J.-P. et Söderlind J. , 2012, *BOIS LAMELLE COLLE : un matériau de performance et d'architecture*, PDF en ligne, 28p, <http://www.martin-charpentes.com/sites/default/files/documents/news/bois_lc_0.pdf>, consulté le 20 juillet 2012.
- IRABOIS et CTBA, 2003, *BOIS LAMELLES COLLES (BLC)*, PDF en ligne, 4p, <http://www.hansez-dalem.be/site/FCK_STOCK/File/lamellecolle.pdf?phpMyAdmin=85d5b89591da95efe4864a6c9dcb0f82&phpMyAdmin=dab0cb17b746132870d03e02c32d174a>, consulté le 20 juillet 2012.
- Moso bamboo, s.d., *Les transformations de base du tronc de bambou* , PDF en ligne, 1p, <http://www.moso-bamboo.com/files/EN_MOSO%20The%20transformation%20of%20the%20bamboo%20stem.pdf>, consulté le 9 juillet 2012.

Pages internet

- 123 Bamboo, s.d., "Bamboo manufacturing process" in *Bamboo flooring and furniture*, en ligne, <http://www.123bamboo.com/manufacturing2.htm>, consulté le 3 juillet 2012.
- Actu Environnement, 2012, "Dictionnaire Environnement" in *Actu Environnement : actualité, news, newsletter environnement et développement durable*, en ligne, <http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4>, consulté le 21 juillet 2012.
- ALEL, s.d., "Comparatifs des coûts d'utilisation" in *ALEL, conception de véhicules et produits électriques professionels ou de loisir*, en ligne, <http://www.alel.fr/francais/comparatifs_tron3.htm>, consulté le 13 juillet 2012.
- Animal Info, 2005, "Golden Bamboo Lemur" in *Endangered Animals - Rare, Threatened and Endangered animal and mammals*, en ligne, <http://www.animalinfo.org/species/primate/hapaaure.htm>, consulté le 4 juin 2012.

- Association Européenne du Bambou (AEB), s.d., "Le bambou : description" in *Bienvenue sur lesite AEB France*, en ligne, <http://www.aebfrance.fr/public/aeb.com/bambou-botanique/description.html>, consulté le 4 juin 2012.
- ASUS, 2008, "[Natur.e] ASUS Bamboo Series" in *ASUS events*, en ligne, <http://event.asus.com/notebook/bamboo/>, consulté le 4 juin 2012.
- Bamboo Flooring, s.d., "Bamboo Flooring Reviews" in *Bamboo Flooring*, en ligne, <http://www.bambooindustry.com/blog/bamboo-flooring-reviews.html>, consulté le 9 juillet 2012.
- Blieck A. et Waterlot M., 2012, "Gondwana" in *Encyclopédie Universalis*, en ligne, <http://www.universalis.fr/encyclopedie/gondwana/>, consulté le 4 juin 2012.
- Charlot M., s.d., "Bambous en Europe : pas seulement décoratifs, mais utiles pour l'homme" in *Pépinière Bambouwallonie*, en ligne, <http://www.bambouwallonie.com/les-bambous/bambous-en-europe/>, consulté le 4 juin 2012.
- China TouristMaps, s.d., "Detailed simple map of Zhejiang" in *Map of China*, en ligne, <http://www.chinatouristmaps.com/provinces/zhejiang/simple-map.html>, consulté le 15 juillet 2012.
- Chine Informations, s.d., "Bambou" in *Chine Informations | L'Asie, la Chine*, en ligne, <http://www.chine-informations.com/guide/bambou_1372.html>, consulté le 4 juin 2012.
- Coffey J.R., s.d., "Bamboo's Surprising Medicinal Uses" in *Natural & Herbal Remedies Articles*, en ligne, <http://natural-herbal-remedies.knoji.com/bamboos-surprising-medicinal-uses/>, consulté le 4 juin 2012.
- Complete Bamboo, 2012, "Bamboo Information Ressource" in *Bamboo Plants and Growing Information - Complete Bamboo*, en ligne, <http://www.completebamboo.com/>, consulté le 4 juin 2012.
- Dharmananda S., 2011, "Bamboo as Medicine" in *Institute for Traditional Medicine*, en ligne, <http://www.itmonline.org/arts/bamboo.htm>, consulté le 4 juin 2012.
- Diep thi My Hanh, 2008, "Recherche sur la phytoremédiation pour la protection de l’environnement" in *Ecobambou Phu An*, en ligne, <http://www.ecobambou-phuan.org/theme-2-recherche-sur-la-phytoremediation-pour-la-protection-de-l-environn.html>, consulté le 4 juin 2012.
- Duteil C., 2012, "Le bambou, une plante de bien-être" in *Suite101.fr : la communauté des experts*, en ligne, <http://suite101.fr/article/le-bambou-une-plante-de-bien-etre-a33659>, consulté le 4 juin 2012.
- ecoinvent Centre, s.d., "ecoinvent Centre" in *Home*, en ligne, <http://www.ecoinvent.org/home/>, consulté le 22 juillet 2012.
- Ecole des Mines de Saint-Etienne (EMSE), s.d., "La pyrolyse - défintion" in *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, en ligne, <http://www.emse.fr/~brodhag/TRAITEME/fich12_1.htm>, consulté le 4 juin 2012.
- Edinburgh Zoo, 2012, "Diet of Giant Pandas" in *Edinburgh Zoo | Frequently Asked Questions*, en ligne, <http://www.edinburghzoo.org.uk/about/FAQs/GiantPandas/DietofGiantPandas.html>, consulté le 4 juin 2012.
- Felten O., 2003, "Les usages du bambou" in *Bambou, herbe insolite - Exposition à la Cité des Sciences*, en ligne, <http://archives.universcience.fr/francais/ala_cite/expo/tempo/bambou/usages.html>, consulté le 4 juin 2012.
- Google, , "Itinéraire" in *Google maps*, en ligne, <https://maps.google.be/maps?hl=fr>, consulté le 15 juillet 2012.
- Harding I., s.d., "The phytoremediation" in *The BRITER-Water Project Website*, en ligne, <http://www.briter-water.eu/pages/scientificcontext/>, consulté le 4 juin 2012.
- Landouer P.-Y., s.d., "La croissance et le port des arbres" in *Les arbres*, en ligne, <http://www.lesarbres.fr/croissance.php>, consulté le 26 juin 2012.
- Larousse, 2012, "Dictionnaire français" in *Dictionnaires Larousse français monolingue et bilingues en ligne*, en ligne, <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais>, consulté le 4 juin 2012.
- National Zoo, s.d., "Giant Panda Facts " in *Welcome to the National Zoo*, en ligne, <http://nationalzoo.si.edu/Animals/GiantPandas/PandaFacts/default.cfm>, consulté le 4 juin 2012.
- Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA), 2011, "Ontario Weeds: Witch grass" in *OMAFRA Home Page*, en ligne, <http://omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/ontweeds/witch_grass.htm#general>, consulté le 4 juin 2012.
- PHYTOREM, 2008, "Technologie du BAMBOU ASSAINISSEMENT" in *L'épuration végétale pour un développement durable*, en ligne, <http://www.phytorem.com/Francais/Php/bambou_assainissement.php>, consulté le 4 juin 2012.
- PRé Consultants, s.d., "About SimaPro" in *Life Cycle consultancy and softwares solutions | PRé Consultants*, en ligne, <http://www.pre-sustainability.com/content/simapro-lca-software>, consulté le 22 juillet 2012.
- Pregaldini T., s.d., "Usages du bambou" in *Ecoligne bambou*, en ligne, <http://www.ecoligne-bambou.com/blog/le-bambou/utilisations-bambou>, consulté le 4 juin 2012.
- Steimel C., 2005, "Zhejiang China: Willkommen!" in *Die Chinesische Provinz Zhejiang China*, en ligne, <http://www.zhejiang-china.de/>, consulté le 15 juillet 2012.
- UCL, s.d., "Lexique" in *UCL|Socle integre et transfacultaire de formation en biologie vegetale*, en ligne, <http://www.afd-ld.org/~fdp_bio/lexique.php?page=lexique_liste&skin=home%20(lexique%20botanique)>, consulté le 4 juin 2012.
- Van Den Bossche M., 1996, "Bamboo for Europe" in *European Commission*, en ligne, <http://ec.europa.eu/research/agro/fair/en/pt1747.html>, consulté le 4 juin 2012.
- Waggoner B., 2009, "Carl Linnaeus" in *University of California Museum of Paleontology*, en ligne, <http://www.ucmp.berkeley.edu/history/linnaeus.html>, consulté le 4 juin 2012.